

EN EFFEUILLANT LA CANOPEE

Jean-Claude Bergonzini

AVEC LA CONTRIBUTION BIBLIOGRAPHIQUE DE

NATHALIE BREDAS et KAMEL SOUDANI

ECOFOR

AVANT-PROPOS

Phèdre (Racine) : *Dieu que ne suis-je assise à l'ombre des forêts*

A. Allais : *Certes, on est mieux assis que debout et ... vermouth cassis.*

Ce travail ne prétend pas à l'originalité. C'est une tentative, imparfaite et incomplète, de rassembler, dans une présentation homogène, les contenus de différents articles qui contribuent, chacun dans leur domaine, à éclairer les méthodes et les techniques utilisées pour modéliser le comportement de la lumière en forêt. Alors rendons aux césars ce qui leur appartient. Plus particulièrement à : Andrieu B., Bonhomme R., Guyot G., Lang A.R.G., Prévot L., Norman J.M., Sinoquet H., Varlet-Grancher C., Warren Wilson J. et leurs camarades dont nous avons exploité avec un grand intérêt la littérature.

Merci à Nathalie Bréda et Kamel Soudani sans lesquels ce travail n'aurait pas été entrepris et qui sont les auteurs de la bibliographie jointe.

En réalité, cette démarche est celle d'un ignorant qui cherche à établir, pour son propre compte, les bases de compréhension d'un sujet dont il ignore tout ou presque. Au pas à pas. Au bout du chemin, on obtient un discours dont on peut espérer que d'autres ingénus pourront tirer quelques profits. Si tel est le cas : tant mieux.

En outre, il faut bien constater que si la modélisation des phénomènes d'interférence entre la lumière et le couvert paraît avoir donné lieu à une réflexion honorable, les champs de l'acquisition et du traitement des données restent en partie infirmes. Infirmes d'une métrologie adaptée à la forêt et surtout d'une méthodologie d'échantillonnage et d'estimation qui prendrait en compte les contraintes imposées par la structure spatio-temporelles de notre objet d'étude. Il reste donc beaucoup à faire.

Dernière remarque : il est toujours délicat d'aborder un domaine qui n'est pas le sien. Il est donc probable que ce texte présente des insuffisances : merci de garder votre attention éveillée.

1	Introduction	3
2	Organisation du feuillage	3
2.1	L'indice de surface foliaire	3
2.2	Répartition spatiale des feuilles	7
2.3	La position angulaire des feuilles	10
2.3.1	Distribution azimutale	11
2.3.2	Distribution des inclinaisons	12
3	Interception du feuillage par un faisceau de direction \vec{D}	15
3.1	Projection du feuillage par un faisceau de direction \vec{D}	16
3.1.1	Les projecteurs	16
3.1.2	Les projecteurs moyens	17
3.1.3	Discrétisation	21
3.2	Contact entre le feuillage et une sonde de direction \vec{D}	22
3.3	Fraction ou fréquence de trouées	25
3.3.1	Dispersion aléatoire	26
3.3.2	Autres systèmes de dispersion	28
4	Estimations de l'indice foliaire et de l'inclinaison moyenne.	31
4.1	Estimation de l'indice foliaire	31
4.1.1	Formulation des équations de base	31
4.1.2	Résolution matricielle	32
4.2	Autres méthodes d'estimation	34
4.2.1	Modèle ELP (<i>Ellipsoidal Inversion</i>)	34
4.2.2	Les méthodes proposées par Lang	36
4.3	Estimation de l'angle d'inclinaison	38
5	In memoriam reducere	41
5.1	Nature de la lumière	41
5.2	Comportement de la lumière en milieu homogène	44
5.3	Les flux	46
5.3.1	L'angle solide	46
5.3.2	Définition des paramètres associés aux flux	48
5.3.3	Les unités de mesure	51
5.4	Les rencontres	51
5.5	Le rayonnement solaire	55
5.5.1	Le rayonnement solaire 1: l'évolution du spectre	55
5.5.2	Le rayonnement solaire 2 : les trajectoires du soleil	58
5.5.3	Le rayonnement solaire 3 : l'altération du rayonnement	61

6	Le bilan radiatif et l'ambiance lumineuse en forêt	65
6.1	Les principes généraux des bilans radiatifs	65
6.2	Interception du flux incident	66
6.3	Les flux internes au couvert végétal	68
6.4	Bilan radiatif	70
7	Conclusion	73

EXPLORONS LE FEUILLAGE

1 Introduction

Pour un "ensemble végétal" particulier (arbre, peuplement, plante, culture...), la structure du feuillage peut être caractérisée par de nombreux descripteurs tels que le nombre de feuilles, leurs surfaces, leurs formes, leurs positions respectives dans l'espace. En outre, elle doit être considérée dans ses rapports aux sources lumineuses et à des directions d'observation particulières (par en dessus, par en dessous, en oblique, à la verticale...). L'expérience et les besoins ont conduit les ingénieurs et les chercheurs à réduire ces données à quelques paramètres ou indices "synthétiques" qui sont utilisés pour caractériser "l'ensemble végétal", son évolution et son fonctionnement.

Au-delà de la pertinence de leur définition, ces paramètres posent généralement de gros problèmes d'estimation et d'interprétation. En forêt, ces difficultés sont augmentées par l'inaccessibilité d'une large part de la composante foliaire. Nous allons, dans cette partie, tenter de préciser certaines des notions les plus usuellement utilisées et cela dans le but d'éclairer les métrologies et les modèles développés et utilisés par les gens de l'art.

Tout au long des différentes approches explorées, certaines hypothèses ou références seront le plus souvent tenues pour implicites. Ainsi les feuilles sont-elles assimilées à des surfaces planes et les troncs, les branches, les brindilles, les fruits ou les fleurs, qui composent le couvert, sont, dans la plupart des cas, ignorés ou traités séparément. En outre, on suppose que les surfaces foliaires sont "petites" par rapport à l'espace considéré, toutes de même valeur et les feuilles "nombreuses". Les faisceaux, flux, sondes ou rayons auxquels on se réfère sont assimilables à des jets lumineux, plus ou moins larges, ou à des directions d'observation qui suivent des trajectoires rectilignes.

2 Organisation du feuillage

2.1 L'indice de surface foliaire

Définition. On appelle "indice de surface foliaire" associé au volume V (en anglais LAI ou leaf area index) la surface de l'ensemble des feuilles contenues dans V rapportée à la surface projetée, verticalement, de V sur le sol, ce dernier étant lui-même assimilé à un plan horizontal. La surface des feuilles est mesurée sur une seule face pour tous les feuillus ainsi que pour les résineux

n'ayant des stomates que sur un seul côté de leurs aiguilles (ex. : le sapin pectiné). Dans le cas contraire (ex. : l'épicéa commun), la surface totale de la feuille est prise en compte (on parle parfois d'indice des aiguilles - en anglais : NAI, needle area index)

Cette définition (Pardé J. et Bouchon J., 1988) correspond à l'usage forestier le plus courant. Cependant, dans certains ouvrages ou articles, on a tendance, pour faciliter l'exposé, à généraliser en considérant la projection du volume sur un plan perpendiculaire à une direction \vec{D} quelconque. Une direction qui n'est pas toujours la verticale au sol. En toute rigueur, on devrait parler de l'indice foliaire du volume V vis-à-vis d'un plan de normale \vec{D} . On verra plus loin que, si l'on fait l'hypothèse d'une distribution aléatoire des feuilles dans l'espace, cette précision est en grande partie superflue.

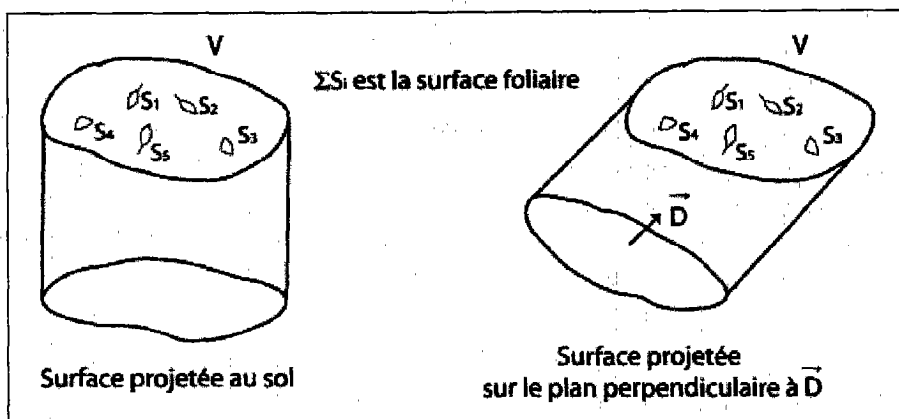


Figure 1 : Principes graphiques de la définition de l'indice foliaire.

Cet indice est directement associé aux capacités d'échange entre les végétaux et l'atmosphère. Il représente une donnée capitale pour caractériser certains processus tels que la photosynthèse, la respiration, l'interception des précipitations, etc. Il est l'une des entrées principales de la plupart des modèles traitant du fonctionnement des écosystèmes. Son estimation a donné lieu au développement de nombreuses méthodes d'évaluation classées dans les catégories directes, indirectes ou semi-directes, selon l'approche privilégiée par l'opérateur.

Pour tenir compte des autres composantes du couvert (troncs, branches...), certains auteurs introduisent d'autres indices tels que le VAI (vegetation area index) ou le PAI (plant area index). Nous n'aborderons pas, sauf de manière marginale, ces démarches complémentaires.

Remarque : contrairement à la densité foliaire, dont on va s'entretenir plus loin, l'indice de surface foliaire (on dit aussi de façon abrégée : l'indice

foliaire) est un rapport de surfaces et n'a pas de dimension. D'où la légitimité de l'appellation (indice).

Tel qu'il vient d'être défini, l'indice foliaire est une fonction du volume V et dépend de la nature et de la position de V . Mais il ne dépend pas "directement" de la valeur du volume V , il n'est fonction que de son contenu foliaire et de la surface projetée. Il s'agit donc bien de caractériser l'abondance foliaire dans une direction donnée. De manière théorique, si l'on considère que l'espace est appréhendé par l'intermédiaire d'un repère cartésien (O, x, y, z) , l'axe Oz étant associé à la verticale du lieu considéré, et si l'on note

$$S(x, y, z, dx, dy, dz),$$

la surface foliaire interceptée par le volume parallélépipédique construit autour du point (x, y, z) et de côtés (dx, dy, dz) , on peut définir la fonction $u(x, y, z)$:

$$u(x, y, z) = \lim_{dx, dy, dz \rightarrow 0} \frac{S(x, y, z, dx, dy, dz)}{dx dy dz}$$

Cette fonction caractérise la "densité foliaire" en (x, y, z) . Pour tout volume V , la surface foliaire contenue dans V , soit $S(V)$, s'écrit :

$$S(V) = \int \int \int_V u(x, y, z) dx dy dz$$

En retour on parlera, avec des supputations plus ou moins conscientes sur l'homogénéité du milieu, de densité moyenne dans le volume V , $S(V)/V$.

Remarque : $u(x, y, z)$, ainsi que $S(V)/V$ sont de dimension m^{-1} (m^2/m^3).

En pratique, on se réfère fréquemment à une surface A (surface simple : cercle, carré...) au sol et au volume $V(A)$ contenu dans l'enveloppe définie par A et les génératrices parallèles à Oz qui s'appuient sur le contour de A et qui sont limitées par le sol et le sommet du couvert végétal. On calcule l'indice foliaire associé à cette surface :

$$LAI = \frac{S(V(A))}{A}$$

et c'est cette valeur, sans dimension, ou tout du moins sa moyenne, qui est le plus souvent utilisée pour décrire le couvert des peuplements forestiers en un endroit donné du sol. Imaginons, pour A limité à quelques mètres carrés, le LAI correspond à la surface foliaire qui surplombe la tête du promeneur. Lorsque ce dernier se déplace dans le peuplement, la valeur du LAI , associée à sa position, varie en fonction de l'épaisseur du couvert.

Si, dans un peuplement donné, on effectue plusieurs mesures correspondant aux surfaces $A_1, A_2 \dots A_n$, on peut calculer la valeur du LAI moyen, \overline{LAI} , sous la forme :

$$\overline{LAI} = \frac{\sum_i S(V(A_i))}{\sum_i A_i}$$

ou procéder à des ajustements par les méthodes des régressions spatiales (en particulier en utilisant les approches géostatistiques) et obtenir une cartographie lissée de l'indice foliaire. Bien évidemment, les règles générales de l'échantillonnage statistique sont à prendre en compte.

On peut aussi découper, par des plans orthogonaux à la verticale Oz , le volume $V(A)$ en "tranches" d'épaisseurs Δz et étudier l'évolution de l'indice selon un gradient vertical (remarquons que cela suppose de se donner une surface de référence A). Cette approche conduit naturellement à associer à cette exploration du couvert une fonction $L(z)$:

$$L(z) = \frac{S(z)}{A}$$

avec $S(z)$, la surface foliaire, comprise entre le sommet H du couvert et la cote z . On a :

$$L(0) = LAI \text{ et } L(H) = 0$$

Cette façon d'associer à la cote verticale z une calibration $L(z)$ est souvent reprise lors de la modélisation de l'intersection de la lumière par le couvert. Elle conduit à opérer une sorte de saut analogique entre le couvert végétal et un milieu dont l'opacité varie, du haut vers le bas, selon un gradient $L(z)$. On utilise aussi la dérivée de $L(z)$. C'est d'ailleurs cette dernière fonction que l'on approche lorsque l'on mesure l'indice foliaire le long des tranches horizontales du couvert. Ce gradient est alors mis, plus ou moins explicitement, en relation avec une fonction $I(z)$ qui traduit l'évolution verticale de l'intensité lumineuse pénétrant le milieu. Du haut vers le bas du couvert, on constate que $I(z)$ diminue.

Remarque : l'indice de surface foliaire est une fonction de l'espace et du temps. L'étude de cette double dépendance est particulièrement informative sur la structuration spatio-temporelle du couvert.

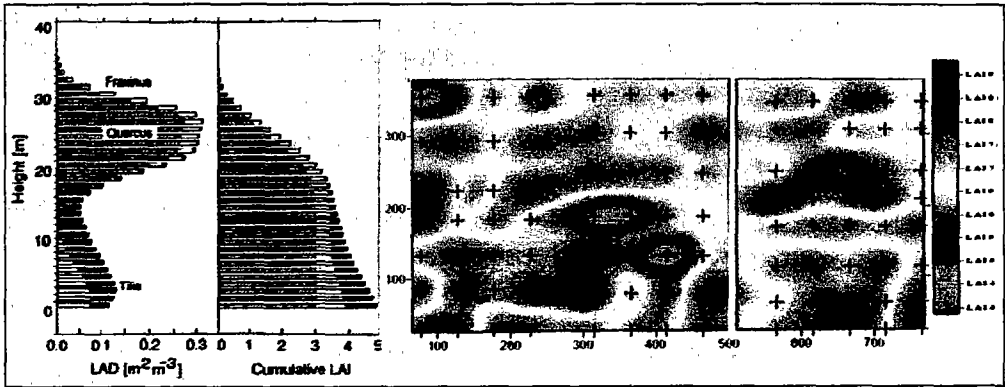


Figure 2 : Surface foliaire, $L(z)$ et $L(z + dz) - L(z)$, dans des peuplements de chênes, de frênes et de tilleuls (Eeemak, 1998) et répartition spatiale (horizontale) du LAI en forêt de Hesse (Bréda N., 2001)

2.2 Répartition spatiale des feuilles

Les modèles de répartition et de dispersion du feuillage traduisent l'agencement des feuilles dans l'espace. Classiquement, les statistiques spatiales se réfèrent à trois modèles de dispersion : aléatoire, régulier et agrégatif. Ces modèles peuvent se combiner et on retiendra que la nature des distributions observées est dépendante de l'échelle spatiale considérée.

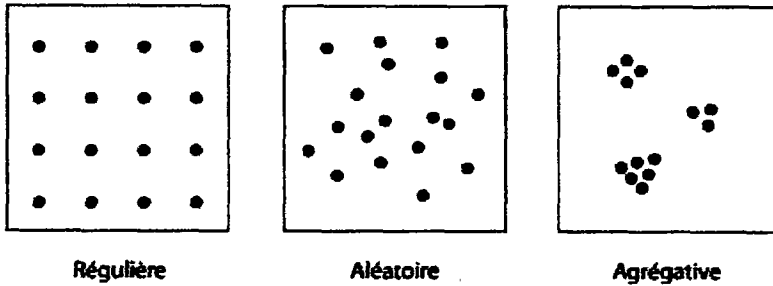


Figure 3 : Exemples des trois répartitions de base dans R^2 .

• Dispersion aléatoire

Soit un volume de référence V_R (espace observé), la répartition foliaire est dite aléatoire dans V_R si, pour tout volume V ($V \subset V_R$), la variable aléatoire X , qui prend pour valeur le nombre de feuilles contenues dans

V , suit une loi de Poisson de paramètre $a = u|V|$ avec u la densité moyenne de feuilles par unité de volume et $|V|$ la valeur du volume V .

$$\text{pour } r \text{ entier positif, on a } P(X=r) = \frac{a^r}{r!} e^{-a}$$

La loi de X est indépendante de la position et de la forme de V dans V_R . Seuls interviennent $|V|$ et u .

Remarque : le nombre moyen de feuilles dans V , c'est-à-dire l'espérance mathématique de $X : E(X)$, comme la dispersion, c'est-à-dire la variance de $X : var(X)$, sont mesurés par $u|V|$. Cette propriété a conduit certains statisticiens à utiliser le rapport $var(X)/E(X)$, dit variance relative, comme un indicateur du type de répartition considéré. Mais il ne s'agit que d'un indice parmi des dizaines d'autres. On montre que :

Dispersion \rightarrow	régulière	aléatoire	agrégressive
$var(X)/E(X) \rightarrow$	$\ll 1$	$\simeq 1$	$\gg 1$

Remarque : considérons un cube C , construit sur un repère (O, x, y, z) et de côté unitaire. Si l'on veut simuler une distribution aléatoire de N feuilles dans C , il suffit de répéter N fois l'opération suivante : sur chacun des trois côtés du cube s'appuyant sur chaque axe du repère, on choisit au hasard une valeur comprise entre 0 et 1 (distribution uniforme) et l'on positionne la feuille sur le point ayant ces trois valeurs pour coordonnées.

• Dispersion régulière

Un exemple de dispersion régulière : soit un dispositif obtenu en dupliquant une feuille initiale f_0 par des translations de vecteurs $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3$ formant un véritable trièdre :

$$f_{ijk} = f_0 + i\vec{V}_1 + j\vec{V}_2 + k\vec{V}_3 \quad (i, j, k) \text{ trois entiers}$$

Cette opération assure un maillage régulier de l'espace. Bien évidemment, dans la nature, une telle régularité est peu probable. On peut donc accompagner la construction de la grille d'un bruit aléatoire pour peu qu'il soit de faible amplitude par rapport aux vecteurs \vec{V}_i :

$$f_0 + k\vec{V}_i + \vec{v} \quad |\vec{v}| \ll |\vec{V}_i|$$

avec la distribution directionnelle de \vec{v} uniforme et la distribution de $|\vec{v}|$ normale. On observe de telles distributions lorsque l'on est en présence de familles de prédateurs qui se répartissent de manière égalitaire des

“territoires” de chasse, ou face à des éléments qui cherchent à occuper l’espace avec un minimum de dépense énergétique (ex. : optimisation de l’accès à la lumière en minimisant la production de feuilles).

La loi de la variable X égale au nombre de feuilles contenues dans un volume V dépend de la nature et des dimensions du treillis. Elle dépend, comme dans le cas précédent, de u et de $|V|$. Elle n’est pas, sauf cas particuliers, indépendante de la forme du volume V .

• Dispersion agrégative

Des exemples de distributions agrégatives se construisent en prenant appui sur les deux modèles précédents mais en associant à chaque point du processus spatial initial (on parle de foyers ou de centres mères) non pas une feuille mais une grappe, ou un agrégat de N feuilles voisines. *A priori*, on peut penser que l’architecture générale des arbres (un tronc, des branches, des brindilles) conduit à une occupation de l’espace par agrégats.

• Remarque

Il existe plusieurs méthodes pour juger des caractéristiques d’une dispersion spatiale. Toutes sont soumises à des contraintes d’échelle. On trouvera l’inventaire de ces méthodes dans les ouvrages spécialisés (Cressie N., 1991 ; Ripley B.D., 1981 ; Upton G.J.G. and Fingleton B., 1989).

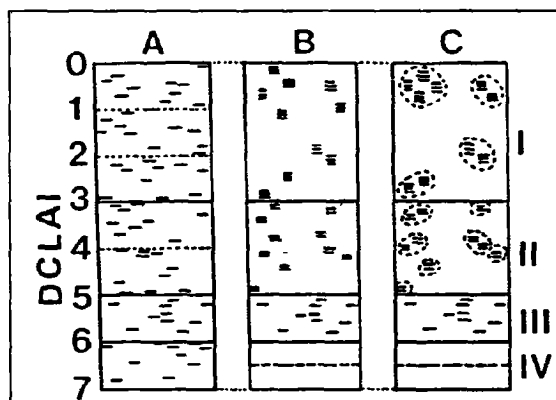


Figure 4 : *Dispersion verticale du feuillage (Sinoquet H. et Andrieu B., 1993). $DCLAI=L(z)$. On représente trois scénarios. A : dispersion aléatoire dans les quatre niveaux I, II, III, IV; B et C : dispersion agrégative en I et II; aléatoire en III et régulière en IV.*

2.3 La position angulaire des feuilles

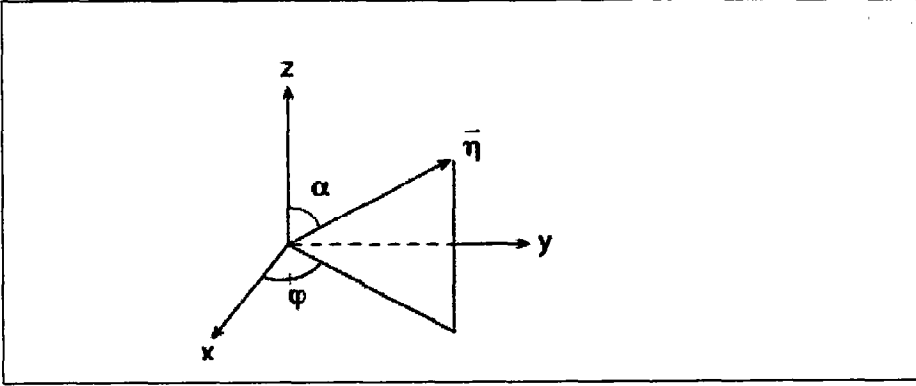


Figure 5 : Représentation des angles (l'inclinaison, α , et l'angle azimutal, φ) qui caractérisent la normale \vec{n} à la feuille.

Dans l'étude des rapports entre le couvert et la lumière, l'indice foliaire, d'une part, qui s'attache à mesurer l'abondance du feuillage, et les modèles de répartition spatiale des feuilles, d'autre part, qui traitent de l'occupation de l'espace, ne fournissent qu'une description partielle des conditions d'interférence entre les feuilles et la lumière. Pour être complet, on doit tenir compte de l'orientation des feuilles. En effet, ce caractère détermine, pour une grande partie, la capacité des feuilles à intercepter le rayonnement solaire issu d'une direction \vec{D} donnée.

En se référant à un repère cartésien (O, x, y, z) pour lequel Oz symbolise la verticale, deux données angulaires, attachées à la normale au plan foliaire (vecteur unitaire \vec{n}), permettent de positionner l'orientation d'une feuille. Il s'agit de l'inclinaison, α , et de l'angle azimutal, φ .

$$0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi$$

Si l'on s'intéresse à un nombre de feuilles suffisamment important, en théorie un nombre infini, et si $g(\alpha, \varphi)$ désigne la densité de distribution conjointe des deux variables A et F qui prennent pour valeurs les coordonnées angulaires α et φ d'une feuille prise au hasard dans le couvert, on a :

$$\int \int_{\substack{0 \leq \alpha \leq \pi/2 \\ 0 \leq \varphi \leq 2\pi}} g(\alpha, \varphi) d\alpha d\varphi = 1 \quad \text{et} \quad \bar{\alpha} = \int \int_{\substack{0 \leq \alpha \leq \pi/2 \\ 0 \leq \varphi \leq 2\pi}} \alpha g(\alpha, \varphi) d\alpha d\varphi$$

$\bar{\alpha}$ = l'inclinaison moyenne

$$P(\alpha_1 \leq A \leq \alpha_2 \text{ et } \varphi_1 \leq F \leq \varphi_2) = \int \int_{\substack{\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2 \\ \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2}} g(\alpha, \varphi) d\alpha d\varphi$$

A priori, il n'y a pas de raison de supposer que les deux variables aléatoires A et F associées à l'inclinaison et l'azimut sont indépendantes. D'ailleurs, quelques études attentives et un peu d'observation montrent qu'en général il n'en est rien (Kimes et Kirchmer, 1983). Cependant, cette supposition est fréquente et cela essentiellement en raison des facilités de calcul et d'observation qui lui sont attachées.

Indépendance entre l'inclinaison et l'azimut $\Leftrightarrow g(\alpha, \varphi) = g_1(\alpha)g_2(\varphi)$

où $g_1(\alpha)$ et $g_2(\varphi)$ désignent les distributions marginales de α et de φ . On a :

$$P(\alpha_1 \leq A \leq \alpha_2) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} g_1(\alpha) d\alpha \quad P(\varphi_1 \leq F \leq \varphi_2) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} g_2(\varphi) d\varphi$$

Discretisation

Pour avoir une idée de l'aspect de la fonction de densité $g(\alpha, \varphi)$ il suffit de considérer une partition de α et de φ en respectivement p et q classes :

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 \dots \dots < \alpha_{i-1} < \alpha_i \dots \dots < \alpha_p = \frac{\pi}{2}$$

$$0 < \varphi_1 < \varphi_2 \dots \dots < \varphi_{j-1} < \varphi_j \dots \dots < \varphi_q = 2\pi$$

et de compter sur un échantillon de taille N le nombre de feuilles n_{ij} qui appartiennent à chaque classe $[\alpha_{i-1}, \alpha_i] * [\varphi_{j-1}, \varphi_j]$. Aux fonctions $g(\alpha, \varphi)$, $g_1(\alpha)$ et $g_2(\varphi)$ on substitue :

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{N} \quad p_{\bullet j} = \frac{n_{0j}}{N} \quad p_{i\bullet} = \frac{n_{i0}}{N} \quad n_{i0} = \sum_j n_{ij} \quad n_{0j} = \sum_i n_{ij}$$

$$\text{Indépendance : } n_{ij} = \frac{n_{i0}n_{0j}}{N} \Leftrightarrow p_{ij} = p_{i\bullet}p_{\bullet j}$$

2.3.1 Distribution azimutale

La répartition azimutale est couramment modélisée par la distribution uniforme, ce qui revient à considérer qu'il n'y a pas de plan vertical jouant un rôle particulier. Dans de telles conditions :

- pour un arbre, le tronc est vu comme un axe de symétrie;
- pour un peuplement planté, on néglige l'asymétrie introduite par les lignes de plantation, on évite de se positionner à proximité des bordures. Pour un peuplement issu de régénération naturelle, on néglige l'interférence du feuillage avec les trajectoires locales du soleil...

Bien évidemment, dans la plupart des cas, cette hypothèse n'est pas recevable sans justifications complémentaires; toutefois, elle est communément adoptée et se traduit par :

$$\text{Distribution uniforme : } g_2(\varphi) = 1/2\pi$$

2.3.2 Distribution des inclinaisons

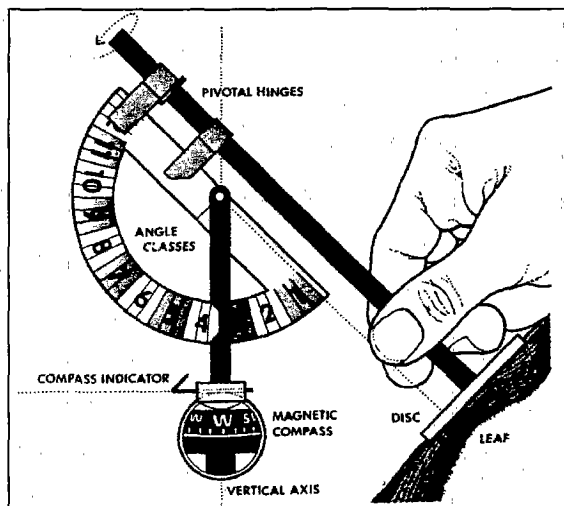


Figure 6 : *Mesure des angles d'inclinaison et d'azimut au moyen du "compass-contractor" : le compas rapporteur (Norman J.m. et Campell G.S., 1989)*

Distribution les plus usitées. La distribution des angles d'inclinaison foliaire a fait l'objet de plusieurs études (Warren Wilson J., 1959 ; De Witt C.T., 1965 ; Ross J., 1981). De nombreuses propositions ont été avancées pour traduire les tendances observées dans les milieux les plus fréquents et relativement aux espèces les plus communes.

Distribution	Feuilles en majorité	$g(\alpha)$	$\bar{\alpha}$
planophile	horizontales	$2(1 + \cos(2\alpha))/\pi$	27°
érectophile	verticales	$2(1 - \cos(2\alpha))/\pi$	63°
plagiophile	obliques	$2(1 + \cos(4\alpha))/\pi$	45°
extrémophile	horizontales et verticales	$2(1 - \cos(4\alpha))/\pi$	45°
uniforme	pas d'inclinaison privilégiée	$2/\pi$	45°
sphérique		$\sin(\alpha)$	$57,3^\circ$

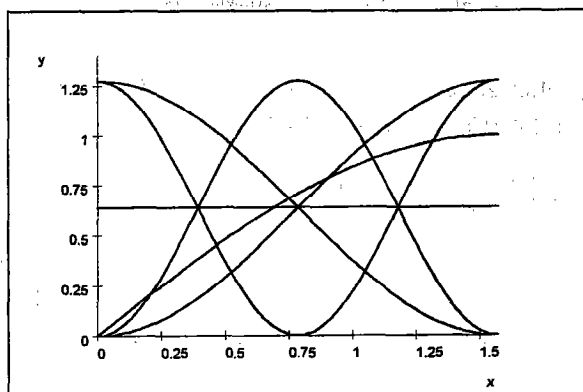


Figure 7 : Représentation de certaines distributions $g(\alpha)$ (α mesuré en radians) : 1) planophile, 2) erectophile, 3) plagiofile, 4) extrêmophile, 5) uniforme, 6) sphérique.

Les distributions sphérique et ellipsoïdale. La distribution sphérique est assez proche d'une distribution érectophile. Elle en module certaines tendances. Du point de vue géométrique, la définition de la distribution sphérique correspond à une démarche de même nature que celle qui est utilisée pour construire la loi uniforme. On considère une demi-sphère Σ de rayon unitaire. Les points de Σ sont repérés par leurs coordonnées angulaires α et φ . Soit Ω une surface localisée sur Σ . La probabilité qu'un point M , pris au hasard sur la sphère, soit situé sur Ω est proportionnelle à la surface de Ω .

$$P(M \in \Omega) = \frac{\text{surface}(\Omega)}{\text{surface}(\Sigma)} = \frac{\int_{\Omega} \sin(\alpha) d\alpha d\varphi}{2\pi}$$

Sur cette base, la distribution de densité $g(\alpha, \varphi)$ est égale à $\sin(\alpha)/2\pi$ et si, faisant l'hypothèse d'indépendance entre azimuth et inclinaison, on pose $g_2(\varphi) = 1/2\pi$, on obtient $g_1(\alpha) = \sin(\alpha)$. Sous cet éclairage, dire que la distribution des inclinaisons est sphérique revient à dire que, les surfaces des feuilles étant prises égales à l'unité, la distribution des surfaces projetées verticalement sur le plan horizontal est uniforme sur $[0, 1]$. En effet, si la distribution est sphérique, on a, A désignant la variable aléatoire qui prend pour valeur α et en remarquant que $\cos \alpha$ est égal à la projection d'une surface unitaire d'inclinaison α :

$$P(\alpha_1 \leq A \leq \alpha_2) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin(\alpha) d\alpha = \cos \alpha_1 - \cos \alpha_2 = P(\cos \alpha_1 \geq \cos A \geq \cos \alpha_2)$$

On retiendra que la moyenne de la distribution des surfaces projetées est égale à 0,5.

D'une façon plus générale, certains auteurs suggèrent d'utiliser, en place de la sphère, un ellipsoïde. On obtient :

$$g(\alpha) = \frac{2k^3 \sin(\alpha)}{K(\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha)} \quad k = b/a \quad K = k + 1,774(k + 1,182)^{-0,733}$$

(a : le demi-axe horizontal de l'ellipsoïde et b : le demi-axe vertical). Pour $k = 1$, on retrouve la distribution sphérique. La valeur de K est issue d'une formule approchée de la surface de l'ellipsoïde). Notons que :

$$\bar{\alpha} = 150/(\sqrt{k} + 5/3)$$

Cette modélisation, dont la pertinence est limitée à certaines espèces, dispose de la capacité d'adaptation que lui procure le choix judicieux du paramètre k (forme plus ou moins allongée de l'ellipsoïde).

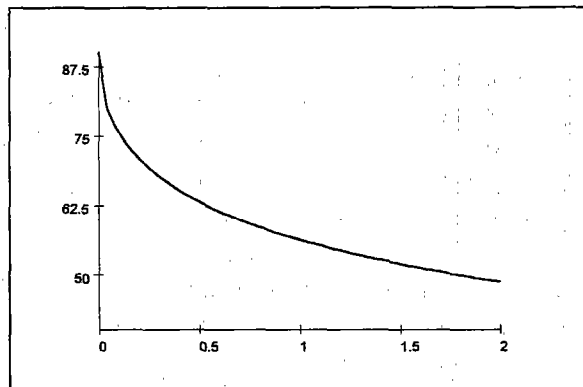


Figure 8 : *Graphique de $\bar{\alpha}$ (mesuré en degrés) en fonction de k (pour $0 \leq k \leq 2$). Pour $k = 0$, $\bar{\alpha} = 90^\circ$; pour $k = 1$, $\bar{\alpha} = 57,3^\circ$; pour $k = \infty$, $\bar{\alpha} = 0$. On remarquera que toutes les valeurs de $\bar{\alpha}$ peuvent être atteintes pour une valeur pertinente de k .*

Discretisation. Considérons la distribution sphérique $g_1(\alpha) = \sin(\alpha)$ et entreprenons d'en discrétiser l'expression sur la base de quatre classes $(0, \pi/8)$ $(\pi/8, \pi/4)$ $(\pi/4, 3\pi/8)$ $(3\pi/8, \pi/2)$, on aura

$$(p_1, p_2, p_3, p_4) = \left(\int_0^{\pi/8} \sin \alpha d\alpha, \int_{\pi/8}^{\pi/4} \sin \alpha d\alpha, \int_{\pi/4}^{3\pi/8} \sin \alpha d\alpha, \int_{3\pi/8}^{\pi/2} \sin \alpha d\alpha \right)$$

$$p_1 = 0,076 \quad p_2 = 0,424 \quad p_3 = 0,118 \quad p_4 = 0,382$$

Remarque. Ces fonctions de formes trigonométriques présentent de nombreux avantages calculatoires. Il paraît que la distribution sphérique est couramment observée en forêt (Sinoquet H. et Andrieu B., 1993), elle est d'ailleurs fréquemment utilisée dans de nombreux modèles de calcul de l'indice foliaire. Au-delà, les suggestions sont nombreuses. Toutefois, sans dédaigner l'intérêt des multiples propositions qui sont faites, on constate que les difficultés sont sans doute dans la bonne adéquation entre le modèle et les observations (très délicates en forêt), dans les limites de généralisation de références établies sur des bases trop particulières (rôle de la sylviculture et des conditions de station) et dans le contrôle et la validation des modèles trop spécifiques (tests statistiques plus ou moins performants). Encore une fois, seuls les grands nombres sauvent les malheureux contrevenants.

3 Interception du feuillage par un faisceau de direction \vec{D}

Cette approche de l'organisation du feuillage (abondance, répartition spatiale, position angulaire) peut être valorisée dans l'observation du nombre de contacts entre un rayon de direction \vec{D} et le feuillage ou lors du calcul de la fraction de trouées. Par fraction de trouées, on entend la probabilité pour un rayon \vec{D} de traverser le couvert sans rencontrer d'obstacle ou, autre formulation, la proportion d'un flux de direction \vec{D} qui atteint le sol sans avoir rencontré de feuilles. De manière plus intuitive, on peut se référer à la proportion de surface du sol directement éclairée dans la direction \vec{D} par rapport à la surface totale. C'est le jeu de l'ombre et de la lumière.

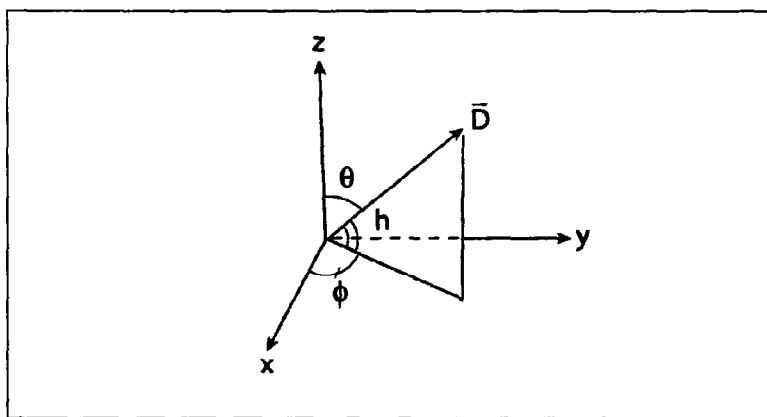


Figure 9 : Représentation des angles associés à l'azimut et à la hauteur d'une direction de vecteur unitaire \vec{D} .

Remarque : la direction \vec{D} (de manière implicite, \vec{D} sera sous-entendu unitaire) est souvent concrétisée par un rayon lumineux ou par la direction d'observation. Pour cette raison, elle sera caractérisée par sa hauteur angulaire h (de préférence à son inclinaison) et son azimut ϕ . Attention : cette convention n'est pas générale et de nombreux modèles, pour ne pas dire la plupart, préfèrent utiliser l'angle d'inclinaison $\theta = \pi/2 - h$ de la direction \vec{D} .

$$0 \leq h \leq \frac{\pi}{2} \quad 0 \leq \phi \leq 2\pi$$

3.1 Projection du feuillage par un faisceau de direction \vec{D}

3.1.1 Les projecteurs

Etant donné une surface S (la feuille) caractérisée par les coordonnées angulaires (α, φ) de sa normale \vec{n} , les projections de S sur le plan perpendiculaire à \vec{D} , soit S' , et sur le plan horizontal (O, x, y) , soit S_o , ont pour valeurs :

$$S' = S |\vec{D} \cdot \vec{n}| \quad \frac{S'}{S} = |\vec{D} \cdot \vec{n}|$$

$$S_o = S' / \sin(h) = S |\vec{D} \cdot \vec{n}| / \sin(h) \quad \frac{S_o}{S} = \frac{|\vec{D} \cdot \vec{n}|}{\sin(h)}$$

$\vec{D} \cdot \vec{n}$ est le produit scalaire entre les vecteurs unitaires \vec{D} et \vec{n} , soit :

$$|\vec{D} \cdot \vec{n}| = |\cos(\psi)| \quad \text{ou} \quad \psi = \text{angle}(\vec{D}, \vec{n})$$

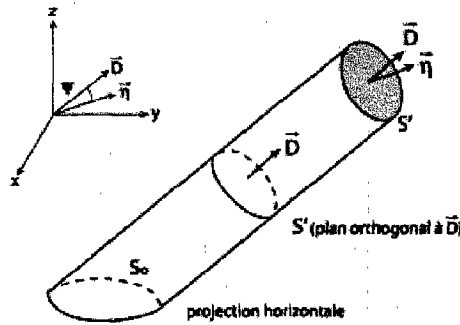


Figure 10 : Projections d'une surface S sur le plan perpendiculaire à \vec{D} et sur le plan horizontal. On remarquera que $S' \leq S$ mais que S_o peut-être inférieur, égal ou supérieur à S .

En décomposant les vecteurs \vec{D} et \vec{n} sur les axes du repère $(O, x, y, z) = (O, \vec{u}, \vec{v}, \vec{k})$ on obtient :

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \cos(h) \cos(\phi) \vec{u} + \cos(h) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \vec{v} + \cos\left(\frac{\pi}{2} - h\right) \vec{k} \\ \vec{n} &= \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cos(\varphi) \vec{u} + \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \vec{v} + \cos(\alpha) \vec{k} \\ \left|\vec{D} \cdot \vec{n}\right| &= |\cos \alpha \sin(h) + \sin \alpha \cos(h) \cos(\varphi - \phi)|\end{aligned}\quad (1)$$

$\vec{D} \cdot \vec{n}$ et $\vec{D} \cdot \vec{n} / \sin(h)$ sont les opérateurs associés respectivement aux projections sur le plan perpendiculaire à \vec{D} et sur le plan horizontal. On peut interpréter leurs valeurs absolues comme les rapports entre les surfaces projetées S' et S_o et la surface foliaire réelle S . Nous noterons $G(h, \phi, \alpha, \varphi) = \left|\vec{D} \cdot \vec{n}\right|$ et $G_o(h, \phi, \alpha, \varphi) = \left|\vec{D} \cdot \vec{n}\right| / \sin(h)$ ces deux projecteurs. Ils jouent des rôles importants puisque c'est au travers de leurs expressions que l'on va "lire" les rapports entre la lumière \vec{D} et le feuillage, lui-même caractérisé par l'ensemble des normales \vec{n} aux feuilles qui le composent.

3.1.2 Les projecteurs moyens

Si $g(\alpha, \varphi)$ désigne la densité de distribution de l'orientation des feuilles, on peut considérer un opérateur de projection "moyen" dans la direction \vec{D} sur le plan horizontal :

$$G_o(h, \phi) = \int_{\alpha=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{2\pi} g(\alpha, \varphi) \frac{\left|\vec{D} \cdot \vec{n}\right|}{\sin(h)} d\varphi d\alpha$$

et un opérateur de projection "moyen" dans la direction \vec{D} sur le plan perpendiculaire à \vec{D} :

$$G(h, \phi) = \int_{\alpha=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{2\pi} g(\alpha, \varphi) \left|\vec{D} \cdot \vec{n}\right| d\varphi d\alpha = G_o(h, \phi) \sin(h) \quad (2)$$

Sauf à faire des hypothèses simples sur la structure de $g(\alpha, \varphi)$, ces intégrales ne sont pas directement calculables et l'on sera contraint d'utiliser des méthodes numériques pour en apprécier les valeurs.

Remarque : $\left|\vec{D} \cdot \vec{n}\right| \leq 1 \implies 0 \leq G(h, \phi) \leq 1$. Ce n'est pas le cas de $G_o(h, \phi)$

Selon la même logique, on peut définir des opérateurs de projection "moyens" pour une inclinaison particulière, α , des feuilles, comme par exemple :

$$G(h, \phi, \alpha) = \int_{\varphi=0}^{2\pi} g(\alpha, \varphi) \left| \vec{D} \cdot \vec{n} \right| d\varphi$$

si l'on admet que $g(\alpha, \varphi) = g_1(\alpha)g_2(\varphi)$ (indépendance entre azimuth et inclinaison) et que $g_2(\varphi) = 1/2\pi$ (distribution azimutale homogène), on a :

$$g(\alpha, \varphi) = g_1(\alpha)/2\pi$$

soit :

$$G(h, \phi, \alpha) = \frac{g_1(\alpha)}{2\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \left| \vec{D} \cdot \vec{n} \right| d\varphi$$

L'hypothèse faite sur $g_2(\varphi)$ a une conséquence importante : la fonction K définie par :

$$K(h, \alpha) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left| \vec{D} \cdot \vec{n} \right| d\varphi$$

est indépendante de φ et de ϕ et peut être considérée comme un coefficient moyen de projection pour les feuilles d'inclinaison α . En revenant à l'expression (1) de $\left| \vec{D} \cdot \vec{n} \right|$, on obtient, sans trop de difficultés :

$$\text{si } h \geq \alpha \quad K(h, \alpha) = \cos \alpha \sin(h) \quad (3)$$

$$\text{si } h \leq \alpha \quad K(h, \alpha) = \left(2 \frac{\varphi_o - tg(\varphi_o)}{\pi} - 1 \right) \cos \alpha \sin(h)$$

$$\varphi_o = \arccos\left(-\frac{tg(h)}{tg(\alpha)}\right) \quad \frac{\pi}{2} \leq \varphi_o \leq \frac{3\pi}{2}$$

Remarque : la valeur φ_o correspond au changement de signe du produit scalaire $\vec{D} \cdot \vec{n}$, c'est-à-dire à la valeur de $\varphi_o = \varphi - \phi$ pour laquelle $\cos(\varphi - \phi) = -tg(h)/tg(\alpha)$. On vérifie que les deux expressions de $K(h, \alpha)$ (calculées pour $\alpha \leq h$ et $\alpha \geq h$) prennent la même valeur pour $h = \alpha$. Quant à $G(h, \phi, \alpha)$, fonction indépendante de ϕ , elle peut s'écrire :

$$G(h, \alpha) = g_1(\alpha)K(h, \alpha)$$

La fonction $G(h, \alpha)$ a été étudiée pour α fixé. Concrètement, une telle attitude revient à poser $g_1(\alpha) = 1$ pour une valeur particulière de α et $g_1(\alpha) = 0$ pour toutes les autres valeurs. Autrement dit à considérer que $K(h, \alpha)$ est le projecteur associé à une distribution pour laquelle toutes les feuilles auraient pour inclinaison la valeur particulière de α . Les graphes ou les tables numériques qui résument son comportement sont souvent sollicités par les

praticiens (voir figure 10). Attention : il est important de ne pas confondre $G(h, \alpha)$ avec $G(h, \phi)$ défini plus haut, et cela malgré l'ambiguïté de la notation.

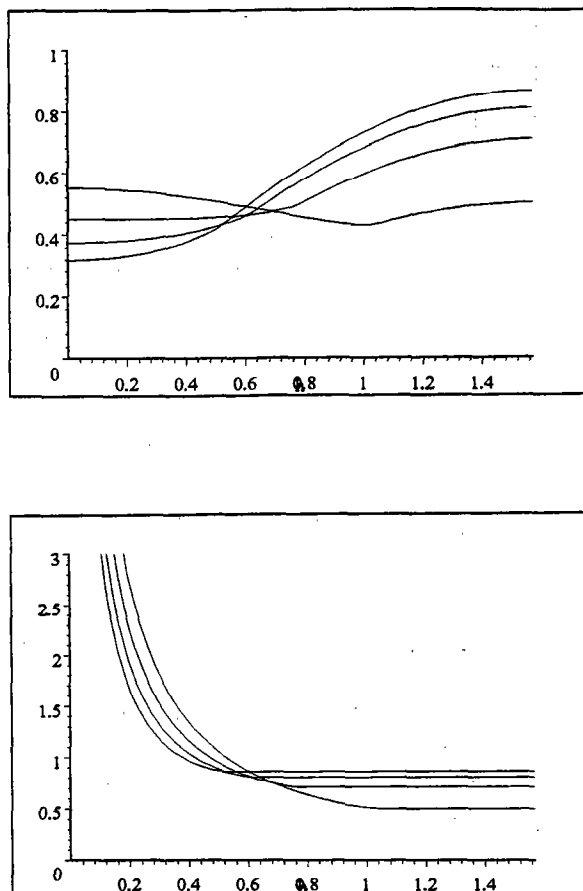


Figure 11 : Représentation de $G(h, \alpha)$ et $G_o(h, \alpha)$ en fonction de h et pour différentes valeurs de α ($\alpha = \pi/6, \pi/5, \pi/4$ et $\pi/3$).

Comportement de la projection moyenne des feuilles d'inclinaison α dans la direction \vec{D} : $G(h, \alpha)$.

En observant le graphique de la figure 8, on peut constater que la fonction de projection $G(h, \alpha)$ est, pour une direction de \vec{D} telle que $h \simeq 32, 5^\circ$, presque indépendante de α et sensiblement égale à 0,5 (voir ci-dessous le graphique de la figure 10). Cette propriété est utilisée par certains expérimentateurs pour obtenir une estimation rapide du LAI (à l'exemple de la méthode des points quadrats inclinés proposée par Warren Wilson J., 1963).

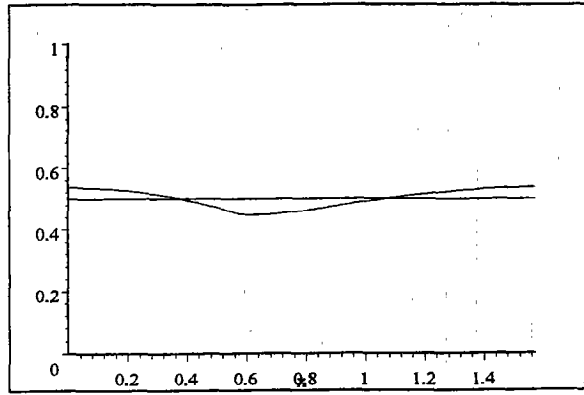


Figure 12 : Représentation de $G(32, 5^\circ, \alpha)$. On constate que $G(32, 5^\circ, \alpha) \simeq 0,5$.

Comportement de $G(h)$, la projection moyenne dans la direction \vec{D} .

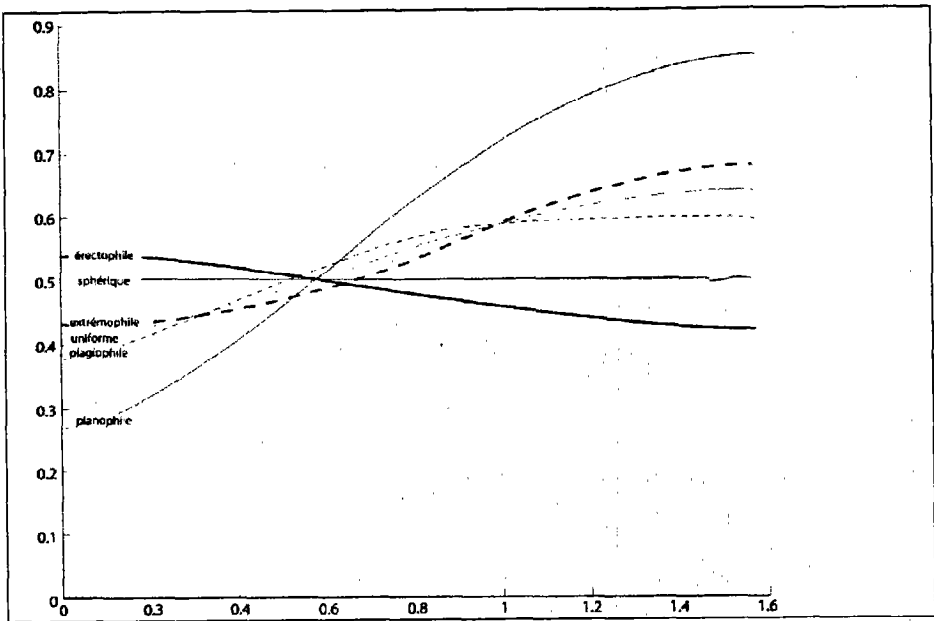


Figure 13 : Représentations de $G(h)$ pour différentes expressions de $g_1(\alpha)$.

Sur cette base (indépendance de la fonction G vis-à-vis de ϕ), on peut formaliser les expressions de $G(h, \phi)$ et de $G_o(h, \phi)$ sous la forme de $G(h)$ et

de $G_o(h)$.

$$G(h) = \int_{\alpha=0}^{\pi/2} K(h, \alpha) g_1(\alpha) d\alpha \quad G_o(h) = G(h) / \sin(h) \quad (4)$$

On peut aussi s'interroger sur la forme de $G(h)$ pour différentes expressions de la densité $g_1(\alpha)$ (planophile, érectophile... et sphérique). C'est ce que permet la figure 9. On voit que pour la distribution sphérique, on a $G(h) = 0,5$. Autrement dit, pour la distribution sphérique le projecteur est indépendant de h . Ce résultat n'est pas étonnant dès lors qu'on le rapproche de ce qui a été observé dans la note du paragraphe 2.3.2; il va être exploité par différentes méthodes d'estimation du LAI.

3.1.3 Discrétisation

Dans la plupart des cas, pour calculer l'intégrale qui définit $G(h)$, on a recours à une approche numérique qui conduit à discrétiser la fonction à intégrer.

$$[0, \pi/2] \Rightarrow \alpha_0 = 0 < \alpha_1 < \alpha_2 \dots < \alpha_i < \alpha_{i+1} \dots < \alpha_n = \pi/2$$

$$g_1(\alpha) \Rightarrow [p_1, p_2, \dots, p_n] \quad \text{avec} \quad p_i \simeq \int_{\alpha_{i-1}}^{\alpha_i} g_1(\alpha) d\alpha$$

$$K(h, \alpha) \Rightarrow \left[K(h, \frac{\alpha_0 + \alpha_1}{2}), K(h, \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}), \dots, K(h, \frac{\alpha_{n-1} + \alpha_n}{2}) \right]$$

$$G(h) \simeq \sum_i K(h, \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2}) p_i$$

$$G_o(h) = \frac{G(h)}{\sin(h)} \simeq \sum_j K_o(h, \frac{\alpha_{j-1} + \alpha_j}{2}) p_j \quad K_o = \frac{K(h, \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2})}{\sin(h)}$$

On a déjà vu que l'on pouvait mesurer sur le feuillage les valeurs des p_i (voir 2.3, ici on note $p_i = p_{i0} = n_{i0}/N$) et calculer les $K_j = K(h, \frac{\alpha_{j-1} + \alpha_j}{2})$. Toutefois, plus couramment on obtient les p_i en se donnant une expression réaliste de $g_1(\alpha)$

$$p_i \simeq \int_{\alpha_{i-1}}^{\alpha_i} g_1(\alpha) d\alpha \simeq g_1(\frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2}) [\alpha_i - \alpha_{i-1}]$$

Tableau des valeurs de $K(h, \alpha)$ pour différentes valeurs de h et de α .

	$\alpha = 15$	$\alpha = 25$	$\alpha = 35$	$\alpha = 45$	$\alpha = 55$	$\alpha = 65$	$\alpha = 75$	$\alpha = 85$
$h = 5$	0.173	0.272	0.366	0.450	0.520	0.575	0.613	0.632
$h = 15$	0.257	0.304	0.378	0.450	0.512	0.561	0.595	0.612
$h = 25$	0.420	0.382	0.407	0.453	0.497	3.727	0.561	0.575
$h = 35$	0.571	0.519	0.469	0.463	0.479	0.497	0.512	0.520
$h = 45$	0.704	0.640	0.579	0.499	0.463	0.453	0.450	0.450
$h = 55$	0.815	0.742	0.670	0.579	0.470	0.407	0.378	0.366
$h = 65$	0.902	0.821	0.742	0.640	0.520	0.383	0.303	0.272
$h = 75$	0.962	0.875	0.791	0.682	0.554	0.408	0.250	0.172
$h = 85$	0.992	0.902	0.815	0.704	0.571	0.421	0.258	0.086

Remarque : A titre d'exemple, considérons les variations de $K(h, \alpha = 35^\circ)$ pour h compris entre 25° et 75° . On peut constater que la fonction se comporte comme une fonction linéaire. On pourrait faire un constat identique pour d'autres valeurs de α . Cette propriété sera valorisée plus loin (4.2.2).

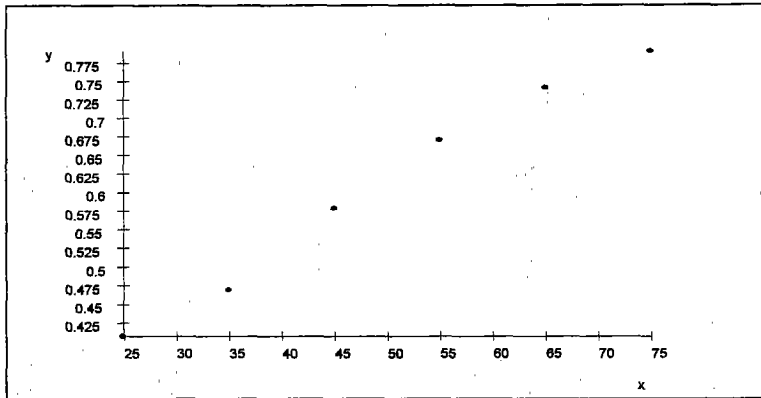


Figure 14 : Variations de $K(h, 35^\circ)$ pour h compris entre 25° et 75°

3.2 Contact entre le feuillage et une sonde de direction \vec{D}

On introduit une sonde de direction \vec{D} . Plus précisément, on imagine un rayon de direction \vec{D} , et autour de la droite D un cylindre C de rayon r . En traversant le feuillage la sonde découpe sur chaque feuille f , de surface L_f , une surface $L_f \cap C$. La projection de $L_f \cap C$ sur le plan perpendiculaire à \vec{D} est égale à $(L_f \cap C) \left| \vec{D} \cdot \vec{n} \right|$ et sa projection moyenne, qui tient compte de la distribution $g(\alpha, \varphi)$ des orientations des feuilles, a pour valeur :

$$\int \int (L_f \cap C) \left| \vec{D} \cdot \vec{n} \right| g(\alpha, \varphi) d\alpha d\varphi = (L_f \cap C) G(h, \phi)$$

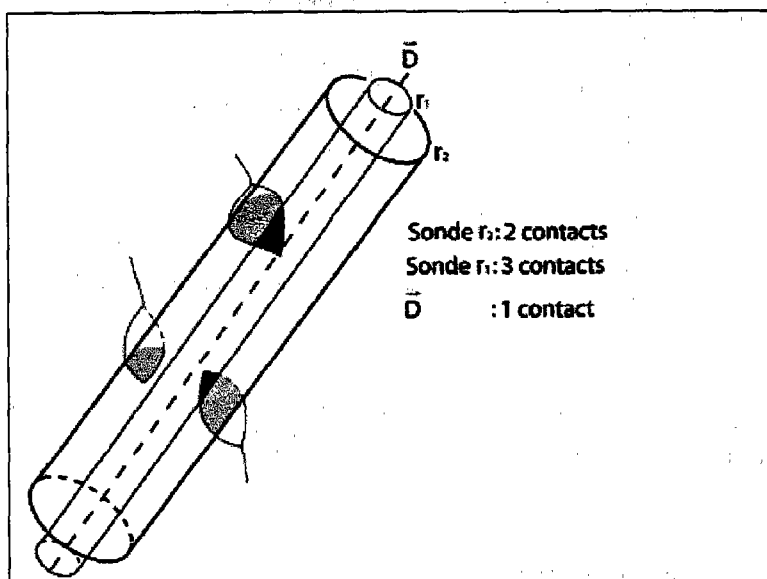


Figure 15 : Interception du feuillage par la sonde de direction \vec{D} .

Il s'agit de la surface projetée moyenne, autrement dit de l'espérance mathématique de la surface projetée, cette dernière étant considérée, pour une direction \vec{D} donnée, comme une variable aléatoire de distribution $g(\alpha, \varphi)$.

Soit $N(h, \phi, r)$ le nombre de feuilles interceptées par la sonde. On précisera plus loin les suppositions éventuelles sur la longueur de la sonde. Pour r suffisamment petit, la projection de $L_f \cap C$ sur le plan perpendiculaire à \vec{D} est sensiblement égale à πr^2 . Dans ces conditions, on a :

$$\left[\sum_f (L_f \cap C) \right] G(h, \phi) \simeq \pi r^2 N(h, \phi, r) \quad \text{si } r \rightarrow 0 \quad N(h, \phi) = L' G(h, \phi)$$

avec L' la surface cumulée rapportée à l'unité de surface de la section du cylindre. Comme le LAI, L' est sans dimension. D'ailleurs L' peut-être considéré comme un indice de surface foliaire associé à la direction \vec{D} (voir 2.1). Pour une distribution aléatoire des feuilles dans l'espace, L' est indépendante de la position du cylindre (voir 2.2). Elle ne dépend que de la longueur de la sonde. Par contre, tant que l'on n'a pas fait d'hypothèse sur la distribution azimutale de l'inclinaison des feuilles, la fonction G dépend de ϕ . Supposons que le cylindre C soit de longueur d , soit C_d . De manière complémentaire, on peut introduire $\tau(h, \phi)$ le nombre de contacts par unité de longueur dans la

direction \vec{D} et u la densité de surface foliaire par unité de volume :

$$u = \lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{\sum_f (L_f \cap C_d)}{\pi r^2 d} \right]$$

$$\tau(h, \phi) = u G(h, \phi)$$

u est de dimension m^{-1} et, sous l'hypothèse de distribution aléatoire, u est indépendant de (h, ϕ) . On peut simplifier l'expression précédente si l'on suppose que la distribution azimutale est homogène, donc indépendante de ϕ :

$$\tau(h) = u G(h) \quad (5)$$

D'autre part, cette relation a une retombée importante dans le cas de la distribution sphérique pour laquelle $G(h) = 0,5$ soit :

$$u = 2\tau(h)$$

Dans ces conditions, si $\tau(h)$ est mesuré pour différentes valeurs de h , on peut envisager de calculer u comme la moyenne pondérée des différentes mesures. Le coefficient de pondération le plus pertinent semble être celui que génère la distribution sphérique elle-même, soit $\sin(\alpha) = \cos(h)$; on obtient (Miller J.B., 1967) :

$$u = 2 \int_0^{\pi/2} \tau(h) \cos(h) dh \quad (6)$$

Revenons sur l'expression du nombre de contacts, que l'on suppose indépendant de ϕ (distribution azimutale homogène), mais dans laquelle on va introduire une référence à la longueur d du cylindre considéré :

$$N(h, r, d) \simeq \left[\frac{\sum_f (L_f \cap C_d)}{\pi r^2} \right] G(h) \quad \text{ou} \quad \tau d = u d G(h)$$

Si le couvert végétal est de hauteur moyenne H , on peut constater que, sous l'hypothèse d'une dispersion aléatoire des feuilles, et en ramenant le volume découpé dans la direction \vec{D} à ce qu'il serait dans la direction verticale, on a :

$$LAI = uH = \frac{\sum_f (L_f \cap C_{H/\sin(h)})}{\pi r^2} \sin(h) = \frac{N(h, r, H/\sin(h))}{G(h)} \sin(h)$$

d'où la formule souvent utilisée pour estimer l'indice foliaire :

$$N_0(h) = \frac{G(h) LAI}{\sin(h)} \quad (7)$$

$N_0(h)$ correspond au nombre de contacts enregistré lors d'une traversée complète du couvert dans la direction \vec{D} .

Remarque : si l'on se reporte au paragraphe 2.1 et que l'on considère une sonde telle que $h \simeq 32,5^\circ$ et $G(h, \alpha) \simeq 0,5$ pour toute valeur de α , on a :

$$u \simeq 2\tau \quad LAI = 1,1N(h)$$

Il suffit de considérer un p échantillon correspondant à différentes mesures effectuées pour $h = 32,5^\circ$, (soit $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_p$ ou n_1, n_2, \dots, n_p), pour obtenir une estimation rapide de u ou de LAI :

$$u \simeq \frac{\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_p}{2p} \quad LAI \simeq 1,1 \frac{n_1 + n_2 + \dots + n_p}{p}$$

Ce résultat est utilisé dans la méthode dite des aiguilles (Warren Wilson J., 1963). En pratique, les spécialistes conseillent d'utiliser plusieurs directions ($h = 0^\circ, h = 90^\circ, h = 32,5^\circ$ ou $h = 45^\circ, h = 90^\circ, h = 32,5^\circ$). Ce regard multidirectionnel permet d'obtenir une estimation de u et une évaluation de l'inclinaison moyenne des feuilles. En effet, si l'on connaît $G(h)$ pour différentes valeurs de h , on peut rechercher la valeur de α qui s'adapte au mieux à ces données. Notons que cette méthode est d'une mise en oeuvre très délicate en forêt.

3.3 Fraction ou fréquence de trouées

Dans ce paragraphe, on fait l'hypothèse que la distribution azimutale est uniforme et on exploite les éléments introduits en 2.1. La fraction de trouées est définie comme la probabilité $P_0(h)$ pour qu'un rayon lumineux de hauteur h , traversant le couvert, ne soit pas intercepté par le feuillage. Plusieurs relations existent entre les paramètres de structure du feuillage et la fraction de trouées. Ces relations dépendent de la distribution spatiale des éléments foliaires. Nous allons en discuter certaines expressions.



Figure 16 : Les trouées vues au travers d'un objectif hémisphérique et traitées à différents niveaux de seuillage.

3.3.1 Dispersion aléatoire

Lorsque l'on navigue dans le couvert, en allant du sommet vers le sol, l'indice foliaire varie entre $L = 0$ (au-dessus du couvert, il n'y a pas de feuilles) jusqu'à la valeur au sol, soit $L = LAI$ (voir 2.1). Considérons le niveau pour lequel l'indice a pour valeur L et soit $P(h, L)$ la probabilité qu'un faisceau de hauteur angulaire h ait pénétré jusqu'au niveau L sans être intercepté. On gardera à l'esprit que le niveau L correspond à une coupe horizontale du couvert.

Soit $L + dL$, avec dL suffisamment petit pour ne contenir, potentiellement, qu'une seule couche foliaire. Dans ces conditions, on exclut la possibilité qu'il y ait plus d'une interception dans la bande d'épaisseur dL . Soit p la probabilité que le faisceau rencontre une feuille entre les niveaux L et $L + dL$; p est sensiblement égal à :

$$p \simeq \frac{G(h)dL}{\sin(h)}$$

Remarque : dL est l'accroissement de L par unité de surface, $G(h)dL/\sin(h)$ est la projection de dL sur le plan horizontal. On fait l'hypothèse que la fonction G est indépendante de ϕ .

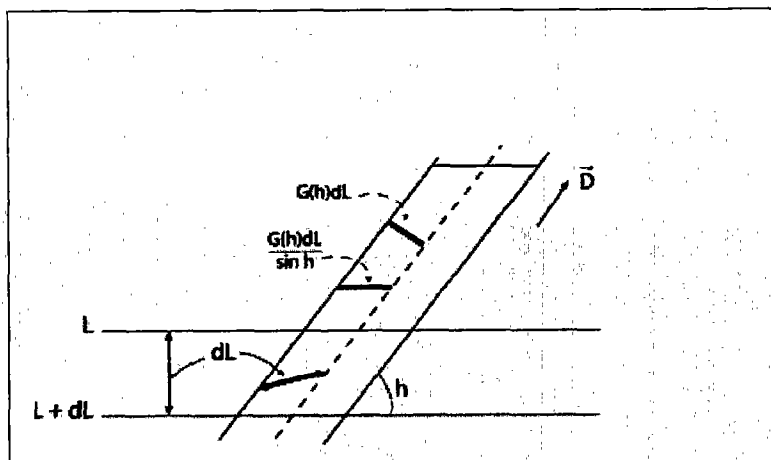


Figure 17 : Bases graphiques de la construction de p et de $P_0(h, L)$.

Si l'on suppose que la répartition des feuilles est aléatoire, il y a indépendance entre ce qui se passe entre $[0, L]$ et entre $[L, L + dL]$. Cette hypothèse sur l'indépendance est semblable à celle utilisée dans le modèle binomiale que nous aborderons dans le paragraphe suivant. Dans ces conditions :

$$P(h, L + dL) = P(h, L)(1 - p)$$

$$dP(h, L) = P(h, L + dL) - P(h, L) = -P(h, L)p$$

$$\frac{dP(h, L)}{P(h, L)} = -\frac{G(h)}{\sin(h)} dL$$

soit en intégrant :

$$P(h, L) = \exp\left(-\frac{G(h)}{\sin(h)} L\right) \quad (8)$$

On remarquera que $P_0(h, L)$ est une fonction décroissante de L et c'est bien agréable. Au sol, pour $L = LAI$:

$$P_0(h) = \exp(-LAI G(h)/\sin(h)) = \exp(-LAIG_o(h)) \quad (9)$$

Pour $LAI = 0$ on obtient $P_0(h) = 1$. Il n'y a pas de feuilles et toute la lumière atteint le sol. En faisant l'hypothèse d'une distribution sphérique des inclinaisons et en considérant la direction associée à la verticale ($G_o(h) = 0,5$), on peut calculer pour $LAI \simeq 4,6$, $P_0(h) \simeq 0,1$.

Remarque : comme on a déjà eu l'occasion de le noter, la répartition des feuilles dans le couvert n'est pas aléatoire et d'autres obstacles que les feuilles se dressent sur le parcours de la lumière. Certains praticiens (Nilson, 1971) proposent de corriger l'expression de $P_0(h)$ par l'introduction d'un coefficient correcteur ω plus ou moins complexe et plus ou moins élaboré, soit : $P_0(h) = \exp(-\omega LAIG(h)/\sin(h))$.

Cette expression est souvent rapprochée de celle qui traduit l'extinction d'un faisceau lumineux pénétrant dans un milieu opaque. Si $I(z)$ désigne l'intensité lumineuse, z la profondeur de pénétration, on admet que :

$$I(z) = I(0) \exp(-\alpha z) \quad (\text{loi dite de Beer-Lambert})$$

La constante α est le coefficient d'extinction et caractérise le milieu. Par analogie, $G(h)/\sin(h)$ est aussi baptisé "coefficient d'extinction" (voir 5.2).

Remarque : on voit que la connaissance de $P_0(h)$, la fraction de trouées dans la direction h , et la modélisation de $G(h)$ permettent d'obtenir par inversion l'indice foliaire :

$$LAI = -\frac{\sin(h)}{G(h)} \text{Log}(P_0(h)) \quad (10)$$

Cette propriété sera exploitée en 3.4.

Remarque : si l'on considère le nombre de contacts avec un rayon de hauteur h , on a :

$$P_0(h) = \exp(-N_0(h)) \quad (11)$$

Cette relation "apparente" les méthodes dites des trouées et des contacts. Mais attention, la robustesse de cette simplification est très dépendante des hypothèses faites sur la répartition aléatoire des feuilles.

3.3.2 Autres systèmes de dispersion

L'hypothèse faite sur la nature aléatoire de la dispersion du feuillage n'est que très rarement vérifiée globalement. En revanche, elle est souvent justifiée localement. Dans de nombreuses situations, d'autres spéculations sont possibles (Nilson T., 1971). A des fins plus cognitives qu'opérationnelles, nous allons présenter d'autres approches qui sont mobilisées pour calculer la fraction de trouées.

Le modèle binomial. Le feuillage est découpé du haut de la canopée au sol en N couches contenant potentiellement une même part dL de l'indice foliaire (dL est l'accroissement rapporté à l'unité de surface horizontale). On suppose le couvert traversé par un faisceau de direction \vec{D} et on va étudier son comportement en fonction de la répartition spatiale du feuillage.

- **Distribution régulière**

On fait l'hypothèse que dL est suffisamment petit pour que le nombre d'interceptions entre le feuillage et \vec{D} soit égal à 1 ou 0 avec les probabilités respectives p_1 et p_0 (voir figure 15) :

$$p_1 = \frac{G(h)}{\sin(h)} dL \quad \text{et} \quad p_0 = 1 - \frac{G(h)}{\sin(h)} dL$$

Si les événements entre les différentes couches sont supposés indépendants, la probabilité d'obtenir n contacts entre le sommet du couvert et le sol est associée à une loi binomiale de paramètres N ($N = LAI/dL$) et p_1 , soit pour $P_0(h)$:

$$P_0(h) = p_0^N = \left(1 - \frac{G(h)}{\sin(h)} dL\right)^N$$

$$P_0(h) = \exp\left[\frac{LAI}{dL} \log\left(1 - \frac{G(h)}{\sin(h)} dL\right)\right]$$

Remarque : si dL est suffisamment petit :

$$\text{Log}\left(1 - \frac{G(h)}{\sin(h)} dL\right) \simeq -\frac{G(h)}{\sin(h)} dL$$

$$\frac{LAI}{dL} \frac{G(h)}{\sin(h)} dL = LAI \frac{G(h)}{\sin(h)}$$

$$P_0(h) = \exp\left(-LAI \frac{G(h)}{\sin(h)}\right)$$

ce qui signifie que, lorsque les feuilles sont en nombre important et que leur taille est réduite, il n'y a guère de différence entre les distributions aléatoire et régulière.

• Distribution agrégative

Note. Rappel sur les lois de probabilité : la distribution géométrique est un cas particulier de la distribution binomiale négative. Cette dernière est souvent mobilisée pour aborder et manipuler conceptuellement des répartitions agrégatives. Cas particulier : on dit que X suit une loi géométrique de paramètre a si pour tout j entier positif :

$$P(X = j) = b^{-1} \left(\frac{a}{b}\right)^j \quad \text{avec} \quad b = 1 + a$$

$$P(X = 0) = \frac{1}{b} \quad \text{et} \quad E(X) = a$$

Revenons vers le découpage du feuillage en bandes, mais cette fois le nombre de contacts dans chaque couche peut être supérieur à 1. La variable associée est modélisée par une distribution géométrique de paramètre $a = G(h)dL/\sin(h)$. Dans ces conditions, pour chaque couche, et en reprenant les notations précédentes :

$$p_0 = \frac{1}{1 + \frac{G(h)}{\sin(h)} dL}$$

et pour N couches :

$$P_0(h) = p_0^N = \exp\left[-\frac{LAI}{dL} \text{Log}\left(1 + \frac{G(h)}{\sin(h)} dL\right)\right]$$

• Comparaison entre les distributions.

Au signe près, les expressions de $P_0(h)$ pour les distributions régulière et agrégative sont semblables.

$+dL$: distribution régulière $-dL$: distribution agrégative

Dans les deux cas, la valeur de $P_0(h)$, lorsque dL tend vers zéro, est équivalente à celle calculée pour une distribution aléatoire. Dans toutes les configurations, la valeur du nombre de contacts moyen, pour LAI donné, est égale à $G(h)LAI/\sin(h)$. Ce qui diffère essentiellement, c'est la valeur de p_0 , plus élevée dans le cas d'une distribution agrégative :

$$\begin{array}{ll} \text{régulière} & p_0 = 1 - \frac{G(h)}{\sin(h)} dL \\ \text{agrégative} & p_0 = \frac{1}{1 + \frac{G(h)}{\sin(h)} dL} = 1 - \frac{G(h)}{\sin(h)} dL + A \quad A > 0 \end{array}$$

Ces comportements limites peuvent encourager l'opérateur à négliger l'étude de la répartition spatiale des feuilles. Toutefois, cette simplification peut poser problème et n'est pas conseillée.

Le modèle markovien. On opère sur les mêmes bases que précédemment, c'est-à-dire en découpant le couvert en tranches d'épaisseur dL , mais on fait dépendre la probabilité d'interception sur la couche c de ce qui est advenu sur la couche $c - 1$. Autrement dit, la probabilité d'interception dans une couche d'épaisseur dL s'écrit :

$$\begin{array}{ll} \mu \frac{G(h)}{\sin(h)} dL & \text{si une interception est advenue dans la couche précédente} \\ \mu_0 \frac{G(h)}{\sin(h)} dL & \text{dans le cas contraire} \end{array}$$

μ et μ_0 sont deux paramètres qui traduisent le degré de dépendance entre les couches. Retenons que leur estimation est difficile, ce qui limite l'utilisation de cette approche (Lemeur R. et Blad B.L., 1974). On obtient :

$$P_0(h) = (1 - \frac{G(h)}{\sin(h)} dL) \exp\left[\frac{L - dL}{dL} \text{Log}(1 - \mu_0 \frac{G(h)}{\sin(h)} dL)\right]$$

Remarque : si $dL \rightarrow 0$, alors $P_0(h) = \exp[-\mu_0 \frac{G(h)}{\sin(h)}]$

Remarque : pour $\mu_0 = 1$, on retrouve l'expression associée à la distribution aléatoire. Pour une distribution régulière, on a $\mu_0 > 1$, pour une distribution agrégative $\mu_0 < 1$.

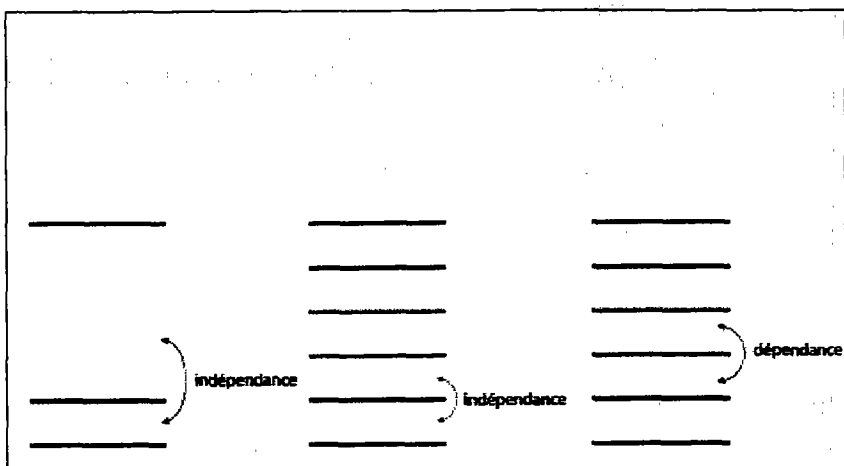


Figure 18 : Gestion des relations de dépendance selon les différentes approches.

4 Estimations de l'indice foliaire et de l'inclinaison moyenne.

4.1 Estimation de l'indice foliaire

4.1.1 Formulation des équations de base

Pour estimer LAI , les méthodes mises en oeuvre sont basées sur l'estimation de la fraction de trouées $P_0(h)$ et sur la modélisation de $G(h)$ (voir formule 9). La difficulté est l'appréciation de $G(h)$.

$$P_0(h) = \exp\left(-\frac{G(h)}{\sin(h)} LAI\right) \Rightarrow L_N[P_0(h)] = -\frac{G(h)}{\sin(h)} LAI \quad (12)$$

où L_N désigne le logarithme népérien. Pratiquement, on discrétise la répartition des angles d'inclinaison des feuilles en n classes :

$$\alpha_0 = 0 < \alpha_1 < \alpha_2 \dots < \alpha_j < \alpha_{j+1} \dots < \alpha_n = \pi/2$$

Dans ces conditions, on a vu au paragraphe 3.1 que l'on pouvait écrire :

$$G(h) \simeq \sum_{j=1}^{j=n} K(h, \frac{\alpha_{j-1} + \alpha_j}{2}) p_j = G(h) \simeq \sum_j K_j(h) p_j$$

expression dans laquelle $K_j(h)$ et L_j sont respectivement les coefficients de projection et les surfaces foliaires associés aux feuilles dont l'inclinaison est

comprise entre α_j et α_{j+1} .

$$L_j \simeq L \int_{\alpha_j}^{\alpha_{j+1}} g_1(\alpha) d\alpha = L p_j \quad K_j(h) = K(h, (\alpha_{j-1} + \alpha_j)/2)$$

$$L = LAI = \sum L p_j = \sum L_j$$

La deuxième partie de l'équation 12 s'écrit :

$$L_N [P_0(h)] = - \sum_j \frac{K_j(h)}{\sin(h)} L_j$$

D'autre part, $P_0(h)$ peut être évalué pour différentes valeurs de h , soit h_1, h_2, \dots, h_m :

$$L_N [P_0(h_i)] = - \sum_j \frac{K_j(h_i)}{\sin(h_i)} L_j$$

4.1.2 Résolution matricielle

Matriciellement le système s'écrit (Norman J.M. et Campbell G.S., 1989) :

$$\begin{bmatrix} L_N [P_0(h_1)] \\ \vdots \\ L_N [P_0(h_m)] \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{K} = [K_{ij}]_{m,n} \quad \text{et} \quad K_{ji} = \frac{K_j(h_i)}{\sin(h_i)}$$

Autres notations plus condensées :

$$\mathbf{L}_N = \begin{bmatrix} L_N [P_0(h_1)] \\ \vdots \\ L_N [P_0(h_m)] \end{bmatrix} \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_N = \mathbf{K} \mathbf{L}$$

Les variables $P_0(h_i)$ sont observées, les facteurs K_{ij} sont évalués sur la base d'une modélisation de l'orientation des feuilles. Pour obtenir les valeurs des L_j , il suffit de résoudre le système matriciel que nous venons de mettre en évidence.

On se retrouve en présence d'un problème d'algèbre linéaire classique et abondamment traité dans tous les bons manuels. Soit :

- Si $n = m$: il y a une solution unique.

- Si $n > m$: il y a plus d'inconnues (les L_j) que d'équations. Le système est indéterminé. La meilleure attitude est de limiter ses ambitions en réduisant n .
- Si $n < m$: le système est surdéterminé. Il y a plus d'équations que d'inconnues et généralement pas de solution. Sauf à changer son fusil d'épaule et à considérer que l'absence de solution naît d'une mauvaise adéquation entre les observations et le modèle. On se retrouve alors devant un problème qui relève de la statistique et plus précisément des méthodes d'ajustement. Dans ces conditions, on cherche les valeurs des L_j qui minimisent la fonction des moindres carrés $\Delta(L_1, L_2, \dots, L_n)$:

$$\Delta(L_1, L_2, \dots, L_n) = \|\mathbf{L}_N - \mathbf{K}\mathbf{L}\|^2 = \sum_i (L_N[P_0(h_i)] - \sum_j K_{ij}L_j)^2$$

Classiquement, on obtient les estimations des L_j en analysant le système de n équations à n inconnues suivant :

$$1 \leq j \leq n \quad \frac{\partial \Delta(L_1, \dots, L_n)}{\partial L_j} = 0 \quad \text{soit} \quad \mathbf{K}'\mathbf{K}\mathbf{L} = \mathbf{K}'\mathbf{L}_N$$

Généralement la matrice $\mathbf{K}'\mathbf{K}$ (\mathbf{K}' transposée de \mathbf{K}) est inversible et la solution est de la forme : $\mathbf{L} = (\mathbf{K}'\mathbf{K})^{-1}\mathbf{K}'\mathbf{L}_N$. Toutefois, la solution n'est pas nécessairement acceptable. Tout au moins dans l'esprit du praticien. C'est le cas lorsque la résolution du système conduit à des estimations des L_j négatives. Pour cette raison, certains logiciels proposent de travailler "sous contraintes". Par exemple en limitant la recherche à des estimations positives des L_j ou, ce qui paraît plus sophistiqué, en imposant aux valeurs des L_j une distribution la moins chaotique possible. Par exemple en introduisant des conditions du genre $L_j = (L_{j-1} + L_{j+1})/2$. Techniquement parlant, on peut dire que l'on effectue un lissage des L_j . Matriciellement, une telle contrainte s'écrit :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ L_5 \end{bmatrix} \quad \text{soit} \quad \mathbf{0} = \mathbf{H}\mathbf{L}$$

La solution du système est obtenue par la méthode dite des multiplicateurs de Lagrange (optimisation sous contraintes) :

$$\mathbf{L} = (\mathbf{K}'\mathbf{K} - \lambda\mathbf{H})^{-1}\mathbf{K}'\mathbf{L}_N$$

La valeur de λ est prise aussi petite que possible, afin de minimiser le poids des contraintes, avec pour préoccupation principale d'obtenir des estimations positives des valeurs L_j .

- *In fine*, on obtient, sous réserve d'une certaine bonne volonté du système une évaluation de L :

$$L = \sum L_j$$

Application numérique : Exemple emprunté à John M. Norman and Gaylon S. Campbell. On considère les fractions de trouées mesurées pour trois valeurs de h ($h = 70^\circ$, $h = 45^\circ$, $h = 25^\circ$). D'autre part, on fait l'hypothèse que les angles d'inclinaison des feuilles sont équidistribuées sur les deux valeurs $\alpha = 22,5^\circ$ et $\alpha = 67,5^\circ$.

h_i	$P(h_i)$	$-L_N(P(h_i))$
70	0,345	1,064
45	0,243	1,414
25	0,09	2,366

$$\mathbf{K} = [G_j(h_i) / \sin(h_i)] = \begin{bmatrix} 0,9239 & 0,3827 \\ 0,9239 & 0,6394 \\ 0,9239 & 1,2828 \end{bmatrix}$$

Solution :

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} = [\mathbf{K}'\mathbf{K}]^{-1} \mathbf{K}' \begin{bmatrix} 1,064 \\ 1,414 \\ 2,366 \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \mathbf{K}' = \begin{bmatrix} 0,9239 & 0,9239 & 0,9239 \\ 0,3827 & 0,6394 & 1,2828 \end{bmatrix}$$

On obtient $L_1 = 0,542$ et $L_2 = 1,449$. Soit $L = L_1 + L_2 = 1,99$

Si on s'impose comme contrainte $L_1 - L_2 = 0$, on obtient, avec $\lambda = 1$, $L_1 = 0,92$ et $L_2 = 1,04$. Soit $L = L_1 + L_2 = 1,96$. Ce qui a changé, c'est la répartition des surfaces foliaires. On remarquera d'autre part que l'on n'a pas $L_1 - L_2 = 0$. En effet, il ne faut pas oublier qu'il s'agit d'une estimation respectant au mieux les conditions imposées par l'ensemble du système.

La méthode que nous venons de présenter constitue la base pratique de la plupart des méthodes d'estimation de la répartition des indices foliaires. Sur cette trame mélodique, les variations sont nombreuses. Nous allons en examiner quelques-unes.

4.2 Autres méthodes d'estimation

4.2.1 Modèle ELP (*Ellipsoidal Inversion*)

Cette approche pourrait se comprendre comme la transcription de la méthode précédente avec l'introduction complémentaire d'une distribution ellipsoïdale de l'inclinaison angulaire modélisée (voir 2.3.2). La distribution ellipsoïdale dépendant d'un paramètre k qui caractérise la forme de l'ellipsoïde de

référence. Ce paramètre serait introduit dans la fonction des moindres carrés comme un élément à estimer, soit :

$$\Delta(L_1, L_2, \dots, L_n, k) = \sum_i (L_N [P_0(h_i)] + \sum_j K_{ij} L_j(k))^2$$

Cependant, du strict point de vue mathématique, un tel système est particulièrement lourd à manipuler. En effet, on a perdu la linéarité de la précédente modélisation. Pour cette raison, on va faire notre deuil de la décomposition de L en L_j . Les promoteurs de la méthode proposent donc une simplification. On va considérer plusieurs directions h_i et utiliser le coefficient de projection moyen dans la direction de hauteur h_i (voir 3.1). Cette approche conduit à minimiser :

$$\Delta(LAI, k) = \sum_i (L_N P_0(h_i) - G_o(h_i, k) LAI)^2$$

avec (voir 2.3.2),

$$G_o(h, k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{K(h, \alpha)}{\sin(h)} g_1(\alpha) d\alpha$$

$$g_1(\alpha) = \frac{2k^3 \sin \alpha}{[k + 1, 774(k + 1, 182)^{-0,733}][\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha]}$$

on obtient (Campbell G.S., 1986)

$$G_o(h, k) = \frac{[(k^2 + \tan^2(h))^{1/2}]}{k + 1, 774(k + 1, 182)^{-0,733}}$$

Pour minimiser $\Delta(LAI, k)$, on est conduit à résoudre le système de deux équations à deux inconnues (LAI, k) :

$$\frac{\partial \Delta(LAI, k)}{\partial LAI} = 0 \quad \frac{\partial \Delta(LAI, k)}{\partial k} = 0$$

On obtient sans trop de difficultés, $G'_o(h_i, k)$ désignant la dérivée de $G_o(h_i, k)$ par rapport à k :

$$LAI = - \frac{\sum_i L_N [P_0(h_i)] G'_o(h_i, k)}{\sum_i G_o(h_i, k) G'_o(h_i, k)} = - \frac{\sum_i L_N [P_0(h_i)] G_o(h_i, k)}{\sum_i [G_o(h_i, k)]^2}$$

La valeur de k est calculée à l'aide d'une approche numérique itérative de la relation

$$\frac{\sum_i L_N [P_0(h_i)] G'_o(h_i, k)}{\sum_i G_o(h_i, k) G'_o(h_i, k)} = \frac{\sum_i L_N [P_0(h_i)] G_o(h_i, k)}{\sum_i [G_o(h_i, k)]^2}$$

et on en déduit l'indice foliaire. Cette méthode ne donne pas la répartition de l'indice foliaire mais, en revanche, elle informe sur la distribution de l'inclinaison des feuilles. Sous réserve du bon choix... "ellipsoïdalien".

4.2.2 Les méthodes proposées par Lang

Dans cette partie du récit, nous jonglerons entre nos choix et ceux de Lang. Plus précisément, Lang choisit de positionner la direction \vec{D} par la valeur de son inclinaison θ , soit $\pi/2 - h$. Pour pouvoir récupérer les outils confectionnés par Lang nous sommes contraint à un peu de gymnastique intellectuelle. Donc attention !

Modèle de Lang 1 (Lang A.R.G., 1990)

La méthode repose sur la simplification suivante : Lang considère que le nombre de contacts moyen par unité de longueur, $\tau(h)$, entre le feuillage et une sonde de direction \vec{D} (hauteur h) peut être ajusté par une droite :

$$\tau(h) = A + Bh$$

Remarque : ajuster $\tau(h)$ par une fonction linéaire de h peut sembler audacieux. En réalité, si l'on observe les variations de $G(h)$ pour α constant ou pour une distribution particulière de $g(\alpha)$, on constate que pour h compris dans un intervalle approprié une telle hypothèse n'est pas extravagante. Lang propose différents ajustements dont celui de la figure 13 calculé pour $h_1 = 25^\circ \leq h \leq h_2 = 65^\circ$. Le nombre de contacts étant directement lié à $G(h)$ (voir formule 5 : $\tau(h) = uG(h)$), la tentation est bien naturelle de linéariser.

D'autre part, on a vu (3.1) que, dans le cas d'une distribution sphérique des inclinaisons, $G(h, \alpha)$ était égal à 0,5 et que $u = 2 \int_0^{\pi/2} \tau(h) \cos(h) dh$, soit en remplaçant $\tau(h)$ par sa nouvelle expression :

$$u = 2 \int_0^{\pi/2} (A + Bh) \cos(h) dh = 2(A - B + B \frac{\pi}{2})$$

La référence à la distribution sphérique associée à la linéarisation de τ permet d'obtenir une estimation rapide de la densité foliaire u .

Remarque : cette formule peut surprendre. En effet, dans la plupart des présentations, en particulier dans l'article de Lang, on utilise pour positionner la direction \vec{D} l'angle $\theta = \pi/2 - h$; ce choix conduit à écrire :

$$\tau(\theta) = a + b\theta \quad \text{et} \quad u = 2 \int_0^{\pi/2} (a + b\theta) \cos(\theta) d\theta = a + b$$

Les deux formulations sont équivalentes dès lors que l'on pose $a = A + B\pi/2$ et $b = -B$.

Dans ces conditions, il suffit d'établir pour plusieurs valeurs de h la relation $(h, \tau(h))$, d'ajuster une droite au nuage de points correspondant pour obtenir

des estimations de A et B , et in fine une évaluation de u . En utilisant les dimensions du couvert, en particulier la hauteur du peuplement et si besoin l'épaisseur du feuillage, on obtient le LAI . Cette méthode n'est pas sans rappeler l'approche suggérée à la fin du paragraphe 3.1. En effet $A+B(\pi/2-1)$ est la valeur de $\tau(h)$ ramenée à l'unité pour $h = (\pi/2 - 1)$ rad, soit pour $h \simeq 32,5^\circ$.

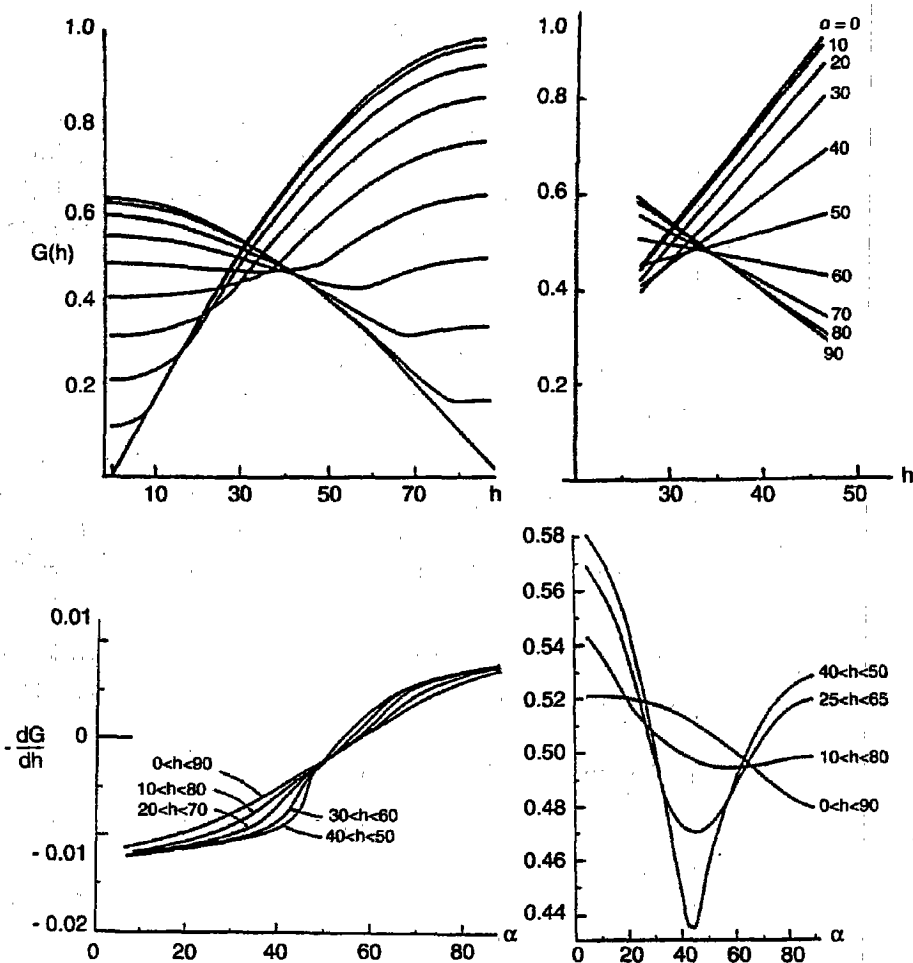


Figure 19-20 : Les outils du petit bricoleur. En haut : la linéarisation de $G(h)$ sur $[h_1 = 25^\circ, h_2 = 65^\circ]$. En bas : évolution de la pente des droites ajustées à $G(h)$ pour différentes valeurs de $[h_1, h_2]$ et le passage de l'inclinaison moyenne à une nouvelle estimation de $G(35^\circ)$. (Lang A.R.G., 1993)

Modèle de Lang 2 (Lang A.R.G., 1993)

L'examen des précédents graphiques est porteur d'une autre information : la pente de la droite ajustée est une fonction monotone de α . C'est cette propriété qui est valorisée dans le graphique 14a où l'on a représenté l'évolution de la pente des droites ajustées à G en fonction de α et cela pour différentes valeurs de l'intervalle $[h_1, h_2]$.

On peut donc passer de la connaissance de la pente de la droite à une estimation de l'angle moyen d'inclinaison $\bar{\alpha}$. Pour faciliter ce travail Lang met à la disposition du praticien le graphique 14b qui permet d'obtenir directement $G(h_o)$ en fonction de α .

Appliquons Lang 1. L'auteur propose de reprendre la démarche précédente (Lang 1) qui va permettre d'obtenir une première série d'estimations des principaux paramètres pour h égal à $h_o = 35^\circ$ (Selon les choix faits par le praticien, h_o peut être exprimé en degrés ou en radians, la valeur de 35° correspondant au choix fait par Lang).

On a :

$$[\tau(h_o)]_1 = A + Bh_o, [G(h_o)]_1 = 0,5$$

$$[u]_1 = 0,5 \tau(h_o) \text{ et } [G'(h_o)]_1 = B/[u]_1$$

Le graphique 14a permet d'évaluer une valeur de l'angle d'inclinaison moyen et à partir de cette évaluation le graphique 14b propose une nouvelle estimation de $[G(h_o)]_2$. D'où une réévaluation de u soit $[u]_2 = [G(h_o)]_2 \tau(h_o)$ puis de $[G'(h_o)]_2 = B/[u]_2$. Ainsi de suite par itération jusqu'à stabilisation des estimations.

Lang justifie la robustesse et la qualité de son approche par l'étude de certaines situations de terrain et la comparaison à certains modèles de référence.

4.3 Estimation de l'angle d'inclinaison

On a déjà abordé ce problème dans le précédent paragraphe. Deux idées semblent devoir être exploitées en priorité : soit inverser la relation entre $G(h)$ et $g_1(\alpha)$, soit se donner un modèle particulier de modélisation de la distribution angulaire et en estimer les paramètres.

Dans la première famille, on trouve la méthode graphique utilisée par Lang. En pratique, cette démarche revient à estimer, pour les intervalles $[h_1, h_2]$ les plus usités, l'angle d'inclinaison moyen $\bar{\alpha}$ par une fonction polynomiale de la dérivée de $G(h)$ en h_o , soit G'_o :

$$\bar{\alpha} = a_0 + a_1 G'_o + a_2 [G'_o]^2 + a_3 [G'_o]^3 + a_4 [G'_o]^4 + a_5 [G'_o]^5$$

Si l'on considère la fonction $G(\theta = \pi/2 - h)$, les valeurs des coefficients a_i pour l'ajustement associé à l'intervalle $[h_1 = 25^\circ, h_2 = 65^\circ]$ sont :

$$(a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) = (56, 82, 46, 85, 64, 62, 158, 69, 522, 06, 1008, 15)$$

Dans la seconde famille, on peut identifier la méthode utilisée dans ELP qui conduit à estimer le paramètre de la distribution ellipsoïdale k ; on obtient :

$$\bar{\alpha} = \frac{150}{(\sqrt{k} + 5/3)}$$

ALLUMONS LA LUMIERE

5 In memoriam reducere

5.1 Nature de la lumière

Depuis les pères fondateurs de l'optique¹, plusieurs modèles auront été mobilisés pour traduire scientifiquement le comportement de la lumière. Cette multiplicité des approches peut troubler tout un chacun dans la mesure où elle conduit à utiliser des représentations qui sans être, à proprement parler, contradictoires se rapportent à des expériences et des référentiels différents. En guise de mise en bouche, nous allons rappeler les principaux modèles sollicités par les physiciens et leurs complices.

Attention : par abus de langage, plus exactement par manque de précision, parfois on parle de lumière pour désigner l'ensemble du rayonnement solaire, parfois pour en désigner la part visible. Le contexte est censé sauver le lecteur.

Le modèle géométrique. La lumière (solaire) est assimilée à un ou un ensemble de rayons parallèles². En milieu homogène, elle se transmet en ligne droite. On ne fait pas d'hypothèses particulières sur la nature du rayon lumineux mais uniquement sur son comportement. Exemple : le principe du "chemin de durée stationnaire" qui pose que dans un milieu hétérogène, mais en l'absence de singularité, le rayon lumineux suit, pour se rendre d'un point A à un point B, la trajectoire qui minimise le temps de parcours entre A et B³. Ce temps est le "chemin optique". Ce modèle est implicitement sollicité

¹Ptolémée Claude, \simeq 85-165 : astronome, il proposa une représentation du système solaire qui resta longtemps fameuse. Auteur de l'*Almageste* (le très grand) sorte de synthèse des connaissances de l'époque et, entre autres, d'un traité sur l'optique où il étudie les lois de la réflexion et de la réfraction.

²Descartes René, 1596-1650 : il avait quatorze ans quand Ravailac connut la célébrité. Il établit les lois de la réfraction et fit beaucoup pour l'esprit français. A la mort de Descartes, Huyghens écrivit en guise d'épithaphe un poème émouvant, respectueux et un tantinet pompié dont voici l'ultime quatrain :

*Nature, prends le deuil, viens plaindre la première
Le grand Descartes, et montre ton désespoir.
Quand il perdit le jour, tu perdis la lumière
Ce n'est qu'à ce flambeau que nous t'avons pu voir*

³Fermat Pierre de, 1601-1665 : magistrat, mathématicien et auteur d'un fameux théorème. En optique, on lui doit la proposition ci-dessus énoncée qui se généralise dans le principe de la moindre action. Il mourut victime d'un accident de la circulation.

dans la plupart des représentations graphiques de nos manuels et nous a sans doute été inspiré par l'observation la plus commune.

Le modèle ondulatoire⁴. La lumière (que l'on supposera, pour l'instant, monochromatique) est assimilée à un système d'ondes électromagnétiques⁵. Parler de système électromagnétique, c'est parler de la superposition d'un champ électrique E et d'un champ magnétique B . C'est-à-dire de la superposition de deux systèmes ondulatoires qui sont intimement liés (toute variation de l'un engendre la variation de l'autre).

Note : rappel sur les systèmes vibratoires. Considérons une source S qui entretient un système vibratoire périodique d'équation : $y(t) = y_0 \cos(2\pi\nu t)$. Le paramètre ν est la fréquence, mesurée en hertz, y_0 l'amplitude maximum, mesurée dans l'unité associée à y , et t le temps. Pour fixer les idées, on peut imaginer une tige qui frappe la surface de l'eau provoquant un déplacement local et vertical proportionnel à $y(t)$. A la distance d de S , on observe une elongation verticale, une vague, $y_d(t) = y_0 \sin(2\pi\nu t - 2\pi\nu d/c) = y_0 \sin(2\pi\nu t - \varphi)$, où c est la vitesse de propagation et φ la phase. Ces deux paramètres, c et φ , dépendent de la nature du milieu (ici de l'eau). Dans l'eau claire de la fontaine, les paramètres (c, φ) n'ont pas les mêmes valeurs que dans l'eau croupie du marais. Deux points en phase à l'instant t ont une même elongation. On remarquera, par référence à notre exemple, que, si à proximité de S la propagation du signal s'effectue de manière concentrique, lorsque d augmente la propagation paraît se faire selon des plans parallèles. C'est ce qui se passe pour nous en présence du soleil. Ajoutons que l'on définit d'autres paramètres, comme la période T et la longueur d'onde λ :

$$T = 1/\nu \quad \lambda = c/\nu = cT$$

Les systèmes vibratoires jouent un grand rôle en modélisation des phénomènes physiques (mécanique, acoustique, électrique, magnétique...).

⁴Huygens Christiaan 1629-1695 : mathématicien et astronome. Auteur d'une théorie ondulatoire de la lumière et de la loi sur la propagation du rayon extraordinaire (phénomènes de biréfringence). Son approche est fondamentalement différente de celle de Newton.

⁵Maxwell James Clerk, 1831-1879 : physicien et touche à tout. Enonce la théorie générale des champs électromagnétique reconciliant durablement l'électricité, le magnétisme et l'optique.

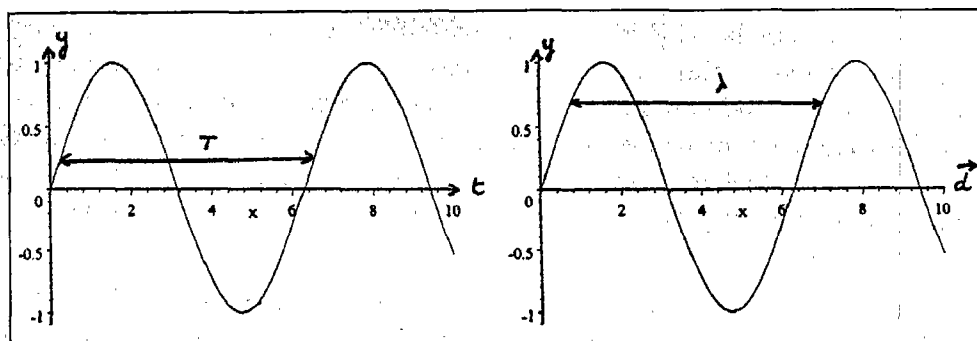


Figure 21 : Aperçu graphique du mouvement vibratoire.

Les deux ondes, qui sont associées à \vec{E} et à \vec{B} , sont transversales et perpendiculaires à la direction de propagation \vec{D} . Elles sont caractérisées par leur fréquence ν et/ou leur longueur d'onde λ et/ou leur période T , leurs amplitudes maximales E_0 et B_0 . Autrement dit, dans l'espace, à chaque point P sont associés deux vecteurs orthogonaux \vec{E} et \vec{B} tels que :

$$\vec{E}(t, P) = \vec{E}_0 \sin(2\pi\nu t - \varphi) \quad \vec{B}(t, P) = \vec{B}_0 \sin(2\pi\nu t - \varphi) \quad \vec{E} \cdot \vec{B} = 0$$

Phénomène ondulatoire, mais, pour ce qui concerne la lumière naturelle, phénomène composé. Le spectre électromagnétique nous enseigne que l'on est en présence d'une "superposition" de vibrations de différentes longueurs d'onde. Depuis longtemps, on a su observer la nature composite de la lumière. Au moins partiellement. Elle est directement perceptible lorsque l'on regarde un arc-en-ciel ou, de manière plus expérimentale, la décomposition de la lumière obtenue par l'intermédiaire d'un spectroscop à prisme ou d'un simple cul de bouteille brisée⁶.

Le modèle corpusculaire. Cette interprétation, au demeurant très ancienne mais dont la théorisation est récente, suppose que la lumière est formée de grains⁷, les photons, d'énergie $E = h\nu$ où h est la constante de Planck, et ν la fréquence de l'émission⁸. Cette relation montre que plus la fréquence

⁶ Becquerel Edmond, 1820-1891 : il étudia le spectre solaire. Son père, Antoine, avait inventé la pile impolarisable à deux liquides, son fils, Henri, découvrit le phénomène de la radioactivité. Quelle famille !

⁷ Newton Isaac, 1642-1727 : mathématicien, physicien, astronome. Fit beaucoup pour les vergers anglais. Doit être considéré avec respect. Auteur d'un traité d'optique où il explore la théorie corpusculaire de la lumière.

< Je ne sais comment je peux être perçu par le monde, mais selon moi, je me suis comporté comme un enfant, jouant sur les bords de la mer, et qui s'est amusé à chercher de temps en temps un caillou plus poli et un coquillage plus joli qu'à l'ordinaire, tandis que le grand océan de vérité s'exposait à moi entièrement inconnu >

⁸ Einstein Albert, 1879-1955 : voir Newton : "doit être considéré avec respect, même par

est forte ou plus la longueur d'onde est faible, et plus la quantité d'énergie transportée par le photon associé est importante. Pour assurer la cohérence avec le modèle ondulatoire, on suppose que les photons de fréquence ν sont associés aux ondes de même fréquence mais c'est l'amplitude de l'onde qui contrôle l'énergie, donc indirectement le nombre de photons émis. Le carillon des anges comme le langage populaire illustrent joliment la réalité corpusculaire de la lumière.

La multiplicité des approches et la diversité des champs d'applications et d'observation associés aux phénomènes lumineux, ont engendré de nombreux systèmes de mesure et de métrologie qui nécessitent, pour s'y retrouver, une attention parfois subtile pour un non-spécialiste.

5.2 Comportement de la lumière en milieu homogène

Si on se réfère à l'approche ondulatoire, on a vu que la base de modélisation était le mouvement vibratoire. Dans un milieu donné, on a rappelé qu'une onde monochromatique était caractérisée par les paramètres (ν, λ, T, c) . Dans le vide, on sait que la vitesse de la lumière est maximale et identique pour toutes les longueurs d'onde. Elle est égale à $c_0 \simeq 3.10^8$ m/s. Les autres milieux (vitesse c inférieure à c_0) sont caractérisés par rapport à ce milieu de référence. Ainsi, pour un milieu homogène, transparent, on définit un indice de réfraction, dit absolu : $n = c_0/c$ (à titre d'information, l'indice de réfraction de l'air est très proche de 1, ce qui en fait dans la pratique un milieu de référence), et, entre deux milieux particuliers, caractérisés par des vitesses de propagation égales à c_1 et c_2 , des indices de réfraction relatifs (c_1/c_2 , c_2/c_1). On verra plus loin le sens à associer au terme réfraction. Ces indices dépendent de la température et jouent un rôle important pour expliquer les changements de comportement de la lumière lorsqu'elle passe d'un milieu dans un autre.

Comportement de la lumière à l'interface de deux milieux. Justement, soit deux milieux M_1 et M_2 d'indices de réfraction absolus n_1 et n_2 séparés par une surface plane et lisse (on parle de dioptré plan ce qui signifie "voir à travers un plan"), et une onde qui se propage de M_1 vers M_2 . Au niveau de l'interface qui sépare les deux milieux, l'onde est, partiellement, réfléchie (renvoyée dans M_1) et partiellement réfractée (transmise dans M_2). Théoriquement, pour une interface dioptré plan, ces deux opérations s'effectuent dans le plan déterminé par l'axe de propagation de l'onde et la normale à la surface (le plan d'incidence). Ajoutons, ce qui peut paraître intuitif, que la notion de surface plane et lisse est relative à la longueur d'onde considérée. Ainsi, une

les amateurs de posters". Le roi de la photoélectricité considérée comme une application de la méthode des quanta à la lumière. L'humanité et Louis de Broglie lui doivent beaucoup.

surface peut-elle être lisse vis-à-vis d'une grande longueur d'onde et perdre cette qualité au regard d'une longueur d'onde plus courte.

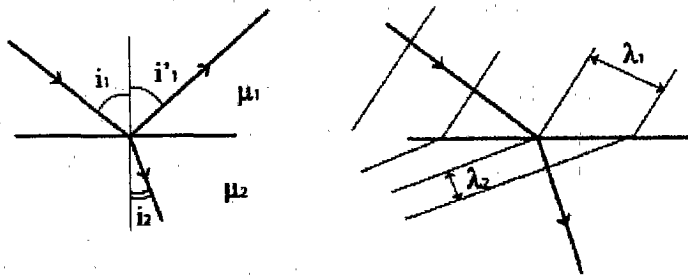


Figure 22 : *Comportement de la lumière à l'interface de deux milieux.*

Dans notre contexte, ces phénomènes sont importants puisque au sein d'un couvert végétal la lumière va heurter différents "objets", traverser différents milieux et, au cours des interférences que génèrent ces rencontres, elle aura l'occasion d'être passablement chahutée. Que sait-on sur le comportement de la lumière en situation réfléchi et/ou réfractée ? Par référence aux notations de la figure, et en notant c_1 et c_2 les vitesses dans les milieux M_1 et M_2 , n_1 et n_2 , les indices de réfraction, et λ_1, λ_2 les longueurs d'ondes correspondantes, on a :

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\sin(i_1)}{\sin(i_2)} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad i_1 = i'_1$$

Dans ce cas d'école, deux conséquences de la réfraction : un changement de direction et un changement de longueur d'onde. D'autre part, on remarquera que :

$$-\frac{\pi}{2} \leq i_1 \leq \frac{\pi}{2} \Rightarrow -\frac{c_2}{c_1} \leq \sin i_2 \leq \frac{c_2}{c_1} \quad \arcsin\left(\frac{c_2}{c_1}\right) \text{ angle de réfraction limite}$$

Ce résultat induit deux conséquences : 1) un rayon se dirigeant vers un milieu plus réfringent ($n_2 > n_1$) est "toujours" réfracté; 2) un rayon se dirigeant vers un milieu moins réfringent ($n_2 < n_1$), avec un angle d'incidence supérieur à l'angle de réfraction limite, n'est pas réfracté.

Les milieux que nous venons de considérer ont été supposés transparents, ce qui signifie qu'ils n'opposent pas d'obstacle à la propagation de la lumière. Si l'on suppose le milieu homogène (au sein du milieu, la lumière n'est pas diffusée) mais non transparent, il y a absorption du flux lumineux. En réalité, c'est l'amplitude de l'onde qui diminue. Ce phénomène d'absorption répond à la règle suivante (voir 3.3.1).

Si z est la distance parcourue par le faisceau lumineux et $I(z)$ la valeur de l'intensité, on a $I(z) = I_0 \exp(-\alpha z)$; le coefficient $\alpha > 0$ est le coefficient d'extinction ou d'absorption⁹. Pour être plus précis, on doit noter que cette loi dépend, par l'intermédiaire de α , de la longueur d'onde considérée. Ainsi dans l'air, on constate que l'atténuation est plus grande dans le violet et l'ultraviolet que dans le jaune.

Si les milieux sont hétérogènes et si la surface qui sépare M_1 et M_2 n'est ni plane, ni lisse, ce qui vient d'être dit reste vrai, mais uniquement localement, même très localement. Ce sont, en chaque point de contact entre les deux milieux, les plans tangents à la surface de séparation qui déterminent les angles de diffusion. Avec d'autant plus de bémol que la longueur d'onde considérée est courte par rapport à la "rugosité" du milieu. Le faisceau de lumière va être réfléchi et réfracté localement selon les principes précédents mais, comme ce local n'est pas général, le faisceau "diffuse" les rayons incidents dans toutes les directions. Si l'on suppose que la diffusion (réfléchie et/ou réfractée) s'effectue du point de vue directionnel, de manière homogène, on parle d'interface "lambertienne". Quelques études ont été consacrées aux interactions lumière-feuille et, selon la nature de la feuille et l'angle d'incidence, plusieurs schémas de diffusion ont été observés.

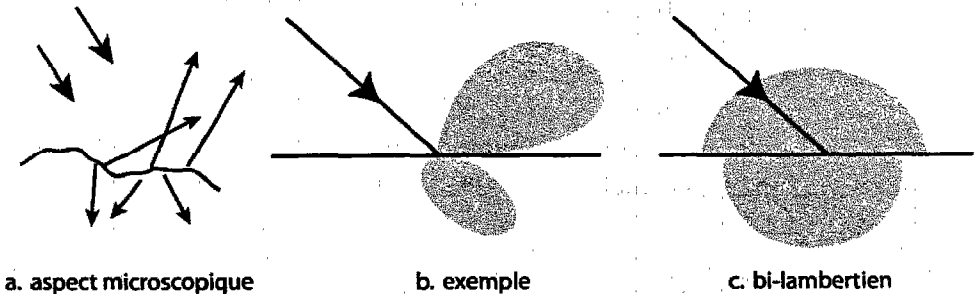


Figure 23 : Exemples de diffusion. On caractérise la diffusion par un diagramme polaire de l'intensité I . Lorsque la distribution de l'intensité est uniforme on parle de système lambertien (il peut être lambertien en réflexion et/ou en réfraction).

5.3 Les flux

5.3.1 L'angle solide

L'approche géométrique conduit à se repérer dans l'espace en mobilisant les principaux outils associés à la description de l'espace vectoriel \mathbb{R}^3 . C'est ainsi

⁹Beer-Lambert : Beer-Lambert n'est pas unique, il est deux.

que les points P de l'espace sont repérés par leurs coordonnées sphériques et les directions par des vecteurs :

$$\overrightarrow{OP} \quad (r, \theta, \phi) \quad r = |\overrightarrow{OP}|$$

et que, pour caractériser le flux lumineux issu d'un point O dans une direction \vec{D} , on utilise souvent la notion d'angle solide $d\Omega(\vec{D})$.

Rappel. L'angle solide peut être défini de la manière suivante : étant donné une surface S , un point O situé à l'extérieur de S et le cône C construit par les génératrices issues de O et s'appuyant sur les contours de S , la valeur de l'angle solide sous lequel on voit S depuis O est égale à la surface $\Sigma(r)$ découpée par le cône C sur une sphère de rayon r divisé par r^2 , soit $\Sigma(r)/r^2$. Cette valeur est indépendante de r (propriété homothétique). Si l'on considère une surface élémentaire dS plane, de normale \vec{n} , centrée sur un point P :

$$d\Omega(\vec{D}) = dS \left| \vec{D} \cdot \vec{n} \right| / r^2 \quad \vec{D} \text{ le vecteur unitaire de } \overrightarrow{OP} \text{ et } r = |\overrightarrow{OP}|$$

$$d\Omega(\vec{D}) = dS \left| \vec{D} \cdot \vec{n} \right| / r^2 = dS |\cos(\theta)| / r^2 \quad \text{avec } \theta = (\vec{D}, \vec{n})$$

Pour un cône de révolution :

$$OP = r \quad r = 1 \Rightarrow d\Omega(\vec{D}) = 2\pi(1 - \cos \beta) \quad \beta \text{ le demi-angle du cône}$$

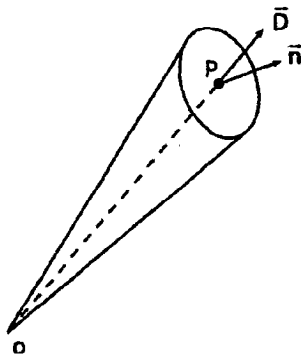


Figure 24 : Représentation de l'angle solide.

L'unité de mesure est le stéradian (sr). L'angle qui correspond à un hémisphère (demi-sphère) a pour valeur 2π sr.

Remarque : si dans un repère (O, x, y, z) on considère un point P de coordonnées angulaires (α, φ) et la surface centrée sur P obtenue à partir de

faibles variations de ces deux paramètres $(d\alpha, d\varphi)$, on a :

$$d\Omega(\overrightarrow{OP}) = \sin(\alpha) d\alpha d\varphi$$

Cette relation conduit certains praticiens à substituer à la fonction de distribution $g(\alpha, \varphi)$, qui caractérise l'orientation des feuilles, la fonction $f(\alpha, \varphi) = g(\alpha, \varphi) / \sin(\alpha)$. L'expression $f(\alpha, \varphi) d\Omega(\overrightarrow{D})$ représente la surface des feuilles d'orientation (α, φ) contenue dans l'angle solide élémentaire $d\Omega$ de direction \overrightarrow{D} .

5.3.2 Définition des paramètres associés aux flux

Emetteur, récepteur. Pour nous, la source principale de rayonnement est le soleil. Pendant longtemps, le feu a constitué l'unique autre source directe de lumière visible et de rayonnement thermique. Depuis de nombreuses années on a créé de nombreuses sources "artificielles". Remarquons qu'un récepteur qui rediffuse du rayonnement devient une source indirecte. En général, on différencie les sources ponctuelles des sources étendues. La source ponctuelle (par exemple : le soleil pour le terrien mais aussi une particule élémentaire excitée à l'échelle de l'atome) est caractérisée par le flux énergétique qu'elle rayonne. Le flux Φ est une puissance, c'est une quantité d'énergie émise par unité de temps. L'unité de mesure est le watt ou le joule par seconde.

Note. On montre que dans un milieu quelconque (vitesse de la lumière égale à c) le flux lumineux instantané $d\Phi(t)$ associé à la surface émettrice dS est proportionnel au carré de l'amplitude de la composante "électrique" de l'onde électromagnétique :

$$\frac{d\Phi(t)}{dS} = k E(t)^2 \quad k = \frac{1}{4\pi} \frac{c_0}{c} 10^{-9}$$

La valeur du flux est donc liée aux caractéristiques de l'onde électromagnétique et en particulier à la valeur de son amplitude. Le flux est distribué de manière sphérique autour de la source. Il peut être considéré dans sa globalité ou dans une direction donnée. Par exemple, le flux $\Phi(\Omega)$ est la part de flux émise dans l'angle solide Ω (voir 5.2.1). L'intensité I est la puissance rayonnée par unité d'angle solide. Elle est mesurée en W sr^{-1} . On a pour un angle solide Ω_0 :

$$\Phi = \int_{\Omega_0} I(\overrightarrow{D}) d\Omega(\overrightarrow{D}) \quad I(\overrightarrow{D}) = \frac{d\Phi}{d\Omega(\overrightarrow{D})}$$

S'agissant d'un flux lumineux, que l'on peut supposer monochromatique pour simplifier l'exposé, les expressions de l'intensité et de la quantité d'énergie prennent la forme d'une fonction trigonométrique plus ou moins simple.

Pour une source étendue, on découpe la surface en petits éléments d'aire dS , chacun étant considéré comme une source ponctuelle. Considérons deux éléments de surface dS et dS' , leurs normales respectives \vec{n} et \vec{n}' , leurs centres O et O' . Notons θ et θ' les angles que fait la droite OO' avec \vec{n} et \vec{n}' et D la distance OO' . L'angle solide sous lequel dS' est vu de O et l'angle solide sous lequel dS est vu de O' s'écrivent :

$$d\Omega = dS' \cos(\theta') / D^2 \quad d\Omega' = dS \cos(\theta) / D^2$$

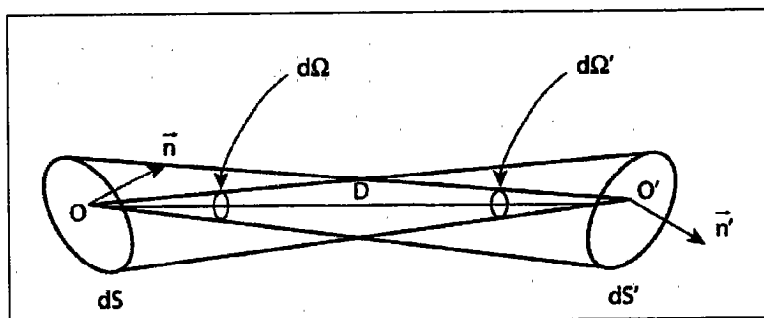


Figure 25 : Bases graphiques de la définition de l'étendue géométrique.

Si l'on suppose les surfaces suffisamment petites, au regard de la distance D la distance, on peut admettre que le flux émis par dS et reçu par dS' est proportionnel (coefficient de proportionnalité L_s) à la projection de dS dans la direction $\overrightarrow{OO'}$, soit $\cos(\theta)dS$, et à l'angle solide $d\Omega$, c'est-à-dire l'angle solide sous lequel on voit dS' de O . La mise en relation de deux surfaces élémentaires dS et dS' justifie de noter ce flux $d^2\Phi$:

$$d^2\Phi = L_s \cos(\theta) dS d\Omega = L_s d^2G$$

La grandeur $d^2G = d\Omega \cdot d\Omega' \cdot D^2$ est appelée "l'étendue géométrique" du pinceau lumineux qui s'appuie sur dS et dS' . On remarquera que d^2G est symétrique par rapport à l'émission et à la réception. Par définition, le coefficient de proportionnalité L_s ($\text{W}/\text{m}^2\text{sr}$) est la **luminance** (ou **brillance**) de la surface dS dans la direction $\overrightarrow{OO'}$ de coordonnées angulaires (ζ, η) . Plus précisément, la luminance telle qu'elle vient d'être définie est un paramètre directionnel qui dépend des positions relatives de dS et de $\overrightarrow{OO'}$. Pratiquement, l'introduction de la surface dS' n'est pas essentielle, elle ne sert qu'à définir l'angle solide $d\Omega$. En toute rigueur, on devrait écrire $L_s(\zeta, \eta)$ pour désigner la puissance rayonnée par dS , par unité d'angle solide et dans une direction de coordonnées angulaires (ζ, η) . Si la luminance est constante dans toutes les directions,

on parle de surface lambertienne¹⁰ (voir 5.2). Les surfaces lisses ont une luminance presque constante.

L'existance (ou émittance) M est la puissance émise par unité de surface de la source. Elle se mesure en Wm^{-2} . Soit le rapport entre le flux $d\Phi$ et la surface dS . Elle peut faire l'objet des mêmes commentaires que la luminance :

$$M_s(\zeta, \eta) = \frac{d\Phi}{dS} = \int L_s(\zeta, \eta) \cos(\theta) d\Omega$$

Si la luminance est indépendante de la direction (surface lambertienne), on a $M = \pi L$.

De manière symétrique, on peut définir **l'éclairement** d'une surface. Considérons la surface réceptrice dS' , elle reçoit un flux $d\Phi'$. On parle d'éclairement (ou irradiance) E pour désigner le rapport $d\Phi'/dS'$. Si $L_{s'}$ désigne la luminance de la surface dS' , on montre que :

$$E = \frac{d\Phi'}{dS'} = \int L_{s'} \cos(\theta') d\Omega'$$

On remarquera que, s'il n'y a pas de perte d'énergie (milieu transparent), alors le flux émis par dS est égal au flux reçu par dS' . Dans ces conditions, la luminance se conserve. Dans le cas contraire, si L_s est différent de $L_{s'}$, il y a lieu d'introduire un facteur de transmission α qui caractérise le milieu dans lequel se fait la propagation et qui se rapporte à la perte d'énergie lors du parcours de dS vers dS' . L'intuition nous porte à penser que ce facteur de correction est un cousin du coefficient d'absorption.

Φ flux mesuré en watts		le flux élémentaire
$d\Phi$ émis par dS	M existence de dS	$M = d\Phi/dS$
$d\Phi$ reçu par dS	E éclairement de dS	$E = d\Phi/dS$
$d^2\Phi$ transmis de dS vers dS' dans l'étendue géométrique $d^2\Omega$		
L la luminance de dS		$L = d^2\Phi/d^2\Omega$

Ce rapide tour d'horizon ne concerne pas, à proprement parler, la matière. Nous n'avons fait intervenir que des surfaces abstraites qui sont susceptibles d'être regardées, vis-à-vis des flux lumineux, comme des entrées ou des sorties. Nous allons, par la suite, resituer ces notions par rapport à des surfaces matérialisées ou des objets quelconques. Autre remarque : même si, pour parler de

¹⁰ Lambert Joahnn Heinrich, 1728-1777 : le nombre π lui est reconnaissant de son statut d'irrationnel, mais il est bien le seul.

flux, nous nous sommes placé implicitement dans un contexte ondulatoire ou corpusculaire, ce sont essentiellement des variables perceptibles par l'oeil que nous avons introduites (luminance, exitance, éclairement).

5.3.3 Les unités de mesure

La radiométrie est la mesure de l'intensité des rayonnements, la photométrie concerne, quant à elle, les excitations visuelles. Ces deux domaines sont restés longtemps indépendants et n'ont été réunis qu'après la découverte de l'identité de nature entre la lumière et le rayonnement thermique. Ces vies séparées, et d'autres, ont conduit à faire coexister des systèmes de mesure particuliers dont le maintien se justifie en raison des métrologies qui sont mises en oeuvre et des applications qui sont en cause

Grandeurs	Energétique	Photonique	Lumineuse
Flux	watt $W=J/s$	photon s^{-1}	lumen $lm=cd.sr$
Intensité	$W.sr^{-1}$	photon $s^{-1}.sr^{-1}$	candella cd
Luminance	$W.m^{-2}.sr^{-1}$	photon $s^{-1}.sr^{-1}.m^{-2}$	$cd.m^{-2}$
Eclairement	$W.m^{-2}$	photon $s^{-1}.m^{-2}$	$lm.m^{-2}$
Exitance	$W.m^{-2}$	photon $s^{-1}.m^{-2}$	$lm.m^{-2}$

Bien évidemment de nombreux autres systèmes sont utilisés. Chaque domaine d'application s'est forgé ses propres variables. Ainsi la météorologie utilise-t-elle le langley, les astronomes différentes sortes de magnitude, les biologistes se repèrent par rapport au nombre d'oses créés... A chacun son "chez soi" pourvu qu'il soit ensoleillé.

Remarque : ose, glucose, fructose, saccharose et autre osides. L'ose est la chaîne carbonée élémentaire qui rentre dans la composition des glucides, il est le résultat de la réaction globale qui caractérise la photosynthèse :



L'énergie nécessaire est égale à $2,913 \times 10^6$ joules/mole et une mole contient $6,02 \times 10^{23}$ molécules¹¹. Il faut donc $4,835 \times 10^{-18}$ joules pour créer un ose. Mais attention, pas sous n'importe quelle longueur d'onde.

5.4 Les rencontres

Gardons en mémoire un principe important : dans un milieu inerte, tous les corps rayonnent, c'est-à-dire qu'ils perdent continuellement de l'énergie. Pour

¹¹ Avogadro Amédeo, 1776-1856 : il a séparé les atomes des molécules. Un drôle de nombre

maintenir leur température, ils doivent compenser leurs pertes en absorbant l'énergie qui leur est fournie par les sources (les autres corps) qui les entourent. C'est cette dualité émetteur et récepteur que nous avons abordée indirectement dans le précédent paragraphe. Toutefois, dans les milieux biologiques, une part de l'énergie est utilisée pour assurer des fonctions vitales, comme la photosynthèse ou le bronzage méditerranéen, ce qui rend plus délicate l'élaboration des bilans énergétiques.

Considérons un obstacle O , de dimensions finies, sur lequel vient percuter un faisceau lumineux. Selon ce qui vient d'être dit, on observe, éventuellement, de la réflexion, de la transmission (réfraction non absorbée) et de l'absorption. Les deux premiers phénomènes pouvant s'accompagner de diffusion.

Si Φ désigne le flux incident atteignant le corps O , on peut donc enregistrer sa décomposition en Φ_A , Φ_R et Φ_T correspondant respectivement aux flux absorbé, réfléchi et transmis. L'importance relative de ces flux dépend des longueurs d'ondes considérées et de la nature du corps. On définit trois coefficients $\alpha = \Phi_A/\Phi$, $\rho = \Phi_R/\Phi$ et $\tau = \Phi_T/\Phi$ dits respectivement d'absorption, de réflexion et de transmission. L'expérience montre que ces coefficients ne dépendent pas de la valeur du flux, mais uniquement du milieu et de la composition spectrale de la lumière. On a :

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

L'énergie réfléchie a fait l'objet de nombreuses études dans la mesure où elle est essentielle à l'accès à des fonctions aussi élémentaires que la vision, mais aussi parce que son importance conditionne les autres fonctions d'absorption et de transmission. La fraction du rayonnement solaire réfléchie par un milieu donné est baptisée albédo. C'est une notion spectrale, c'est-à-dire qui dépend de la longueur d'onde. Aussi parle-t-on, par exemple, de "l'albédo courtes longueurs d'onde" pour désigner le coefficient associé à la bande 0,25 à 3 μm . La détermination de l'albédo renseigne sur les potentialités climatiques et biologique d'un milieu particulier. A titre d'information, mais avec prudence, tant les estimations varient, citons quelques chiffres repères :

milieu :	corps noir	forêt	sol nu sec	sol nu humide	neige	glacier
albédo :	$\simeq 0$	$\simeq 0,2$	$\simeq 0,4$	$\simeq 0,3$	$\simeq 0,8$	$\simeq 0,5$

L'albédo de la forêt n'est pas très élevé, mais l'énergie que la forêt prélève pour sa croissance et son fonctionnement lui permet d'assurer une faible transmission donc une bonne protection des sols.

L'énergie absorbée peut être emmagasinée et provoquer une élévation de température de O , avant d'être restituée (au moins partiellement) sous forme

de rayonnement, ou, comme nous venons de l'évoquer, utilisée dans certains processus chimiques ou biochimiques de transformation de O . La distribution relative de ces comportements dépend de la nature de O . De sa nature physique, biologique et optique. Il y a donc un certain besoin de caractériser les corps du point de vue optique. Pour ce faire, les physiciens ont l'habitude de se référer à un corps théorique qui va leur servir par la suite d'étalon : le corps noir.

Le corps noir.

Le corps noir¹² est un modèle tel que l'exitance est maximale pour toutes les longueurs d'onde. Il ne réfléchit pas, il ne transmet pas, il absorbe ($\alpha = 1$) et restitue les radiations qu'il emmagasine par rayonnement thermique (pour l'essentiel un rayonnement qui s'étend de l'infrarouge à l'ultraviolet) avec le maximum d'efficacité (il s'agit de restitution, ce qui n'est ni une réflexion, ni une transmission). C'est un absorbeur et un radiateur parfait. On peut en réaliser des prototypes presque conformes. A notre échelle de terrien, la Terre et le soleil sont souvent considérés comme des corps noirs.

Remarque : un radiateur parfait paraît blanc aux températures élevées, mais aux basses températures ($\leq 500^\circ C$!) les radiations sont essentiellement concentrées dans l'infrarouge. Invisible, il apparaît noir.

La luminance L du corps noir ne dépend que de la longueur d'onde et de la température. On montre que pour une longueur d'onde λ et une température kelvin T :

$$L = C_1 \lambda^{-5} / \{ \exp(C_2 / \lambda T) - 1 \} \quad C_1 = 1,191062 \times 10^{-16} \quad C_2 = 1,438786 \times 10^{-2}$$

Cette formule peut être approchée dans des zones de longueurs d'onde et pour des températures particulières.

$$\lambda T \ll C_2 \implies L \cong C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2 / \lambda T) \text{ et } \lambda T \gg C_2 \implies L \cong C_1 T / C_2 \lambda^4$$

D'autre part, pour chaque température, on peut calculer la longueur d'onde λ_M pour laquelle la luminance est maximale. On montre que :

$$\lambda_M \cong 2,879 \times 10^{-3} / T$$

¹² Planck Max, 1879-1947 : c'est pour résoudre le problème dit du corps noir que Planck émit l'hypothèse que l'énergie d'un rayonnement se transmettait de manière discontinue et par petites quantités proportionnelles à la fréquence. Intéressant. Aura vécu 7 ans de plus que Jane Avril 1868-1943.

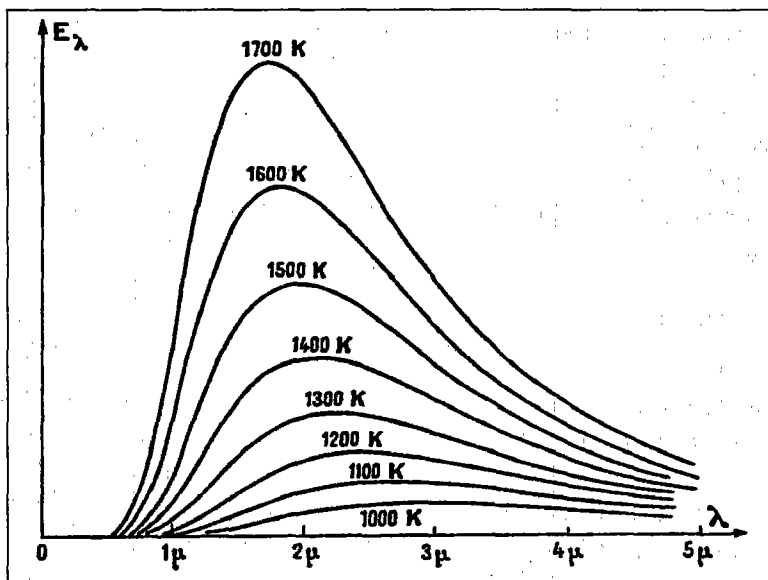


Figure 26 : Exemple d'émission d'un corps noir en fonction de la température. Ce exemple peut être interprété par référence à un acier porté à haute température. Au fur et à mesure que la température s'élève le corps émet avec plus d'intensité dans les courtes longueurs d'onde. L'acier passe dans le rouge, l'orange puis le blanc.

A la température de 17° , pour $\lambda_M = 10,0 \mu\text{m}$, on a $L = 128 \text{ W/m}^2\text{sr}$. Par l'intégration de L sur tout l'espace, on peut obtenir une expression de l'exittance M qui intégrée par rapport à λ exprime de façon simple la relation entre l'exittance moyenne et la température T (échelle kelvin) :

$$M = \sigma T^4 \quad \sigma = 5,67051 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-4}$$

Pour un corps quelconque, le transfert des résultats nécessite l'intermédiaire d'un correcteur qui n'est autre que le coefficient d'absorption α :

$$L(\text{corps quelconque}) = \alpha \cdot L(\text{corps noir})$$

Loin du corps noir, on peut envisager des corps pour lesquels $\alpha = 0, \tau = 0$ et $\rho = 1$ (surface entièrement réfléchissante) ou $\alpha = 0, \rho = 0$ et $\tau = 1$ (milieu transparent), ou $\alpha = a, \tau = 0$ et $\rho = 1 - a$ (corps opaque).

Pourquoi est-on intéressé par ces repères ? Essentiellement parce qu'ils vont nous servir à traduire, au regard des applications étudiées, le comportement des feuilles et des différents obstacles que rencontre la lumière dans le couvert. Ainsi, face à une application où il faut, avant tout, estimer l'énergie absorbée, comme c'est le cas dans l'étude de la photosynthèse, on pourra assimiler les feuilles à des corps noirs. Par contre, cette hypothèse sera considérée

comme inadaptée par le télédécteur qui a besoin de prendre en compte la réflexion du rayon lumineux par les feuilles !

5.5 Le rayonnement solaire

5.5.1 Le rayonnement solaire 1: l'évolution du spectre

On peut considérer que le spectre du rayonnement électromagnétique émis par le soleil couvre une gamme de longueurs d'onde qui s'étend de 0,1 nm à plusieurs kilomètres. La lumière visible ne concerne qu'une bande "étroite" de cette gamme, une bande comprise entre 400 nm et 760 nm mais qui correspond à environ 90% de l'énergie transportée par l'ensemble du rayonnement. C'est dans cette zone du spectre du visible, et dans son voisinage, que se situe, pour une large part, le rayonnement utilisé par la végétation pour ses fonctions biologiques essentielles. Ce rayonnement est baptisé le PAR ou *photosynthetically active radiation*. Les appareils de mesure utilisés pour la mesure du LAI se limitent souvent à explorer le comportement du rayonnement dans cette frange du spectre.

λ nm	440	470	540	580	600	620
couleur	violet	bleu	vert	jaune	orange	rouge

Note : $1 \text{ nm} = 10^{-3} \mu\text{m} = 10^{-9} \text{ m}$.

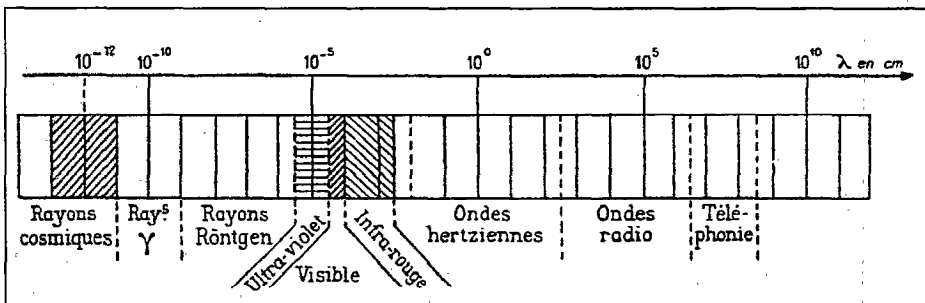


Figure 27 : Les radiations lumineuses dans l'ensemble des radiations électromagnétiques.

En deçà du visible s'étend le domaine de l'ultraviolet ($0,01 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,4 \mu\text{m}$). Les ultraviolets jouent un rôle déterminant dans les réactions chimiques qui accompagnent la photosynthèse, ils impressionnent les films photographiques, d'où certaines mauvaises surprises, et sont les principaux pourvoyeurs du bronzage. Une grande partie des ultraviolets que nous envoie le

soleil est absorbée par l'atmosphère. Au-delà du rouge, les infrarouges ($0,76 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 500 \mu\text{m}$) peuvent être mis en évidence par l'élévation de température qu'ils induisent. D'ailleurs, tout corps dont on élève la température par rapport à son environnement (un radiateur par exemple) émet des infrarouges. Le corps humain émet des infrarouges. Sauf situation alarmante. La plupart des substances transparentes au visible absorbent ou réfléchissent des infrarouges, mais de manière très sélective, c'est-à-dire pour des gammes de longueurs d'onde particulières. A titre d'exemple, considérons une serre. Le verre laisse passer les infrarouges de courtes longueurs d'onde. Le sol les absorbe, s'échauffe et, à son tour, il émet des infrarouges de longueurs d'onde supérieures à $3 \mu\text{m}$ pour lesquels le verre est opaque. La serre piège ainsi l'énergie et sa température interne s'élève. Quant à l'énergie transportée par les ondes du champ électromagnétique, elle est très inégalement répartie en fonction des longueurs d'onde. Le maximum d'émission est situé à environ $550 \mu\text{m}$ et correspond sensiblement à la couleur jaune, la couleur la plus perceptible. Une part importante de l'énergie est portée par les infrarouges :

Long. d'onde (nm)	≤ 290	290/400	400/700	700/4000	≥ 4000
Part d'énergie %	1	8	41	49	1

Les propriétés spectrales sont modifiées lors du passage dans l'atmosphère et lors du trajet qu'effectue la lumière dans le couvert végétal. Le tableau suivant montre les variations de la composition spectrale moyenne du rayonnement incident au sein d'un couvert végétal en fonction de l'indice foliaire (Guyot, 1997) :

LAI	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5
vert/rouge	1,02	1,08	1,12	1,15	1,21	1,33	1,62	2,1
PAR/infrarouge	1,06	0,84	0,66	0,50	0,37	0,21	0,1	0,04

On constate que des variations importantes affectent la composition de la lumière qui traverse la végétation. D'autre part, on enregistre que l'absorption de la végétation dans le rouge est plus importante que dans le vert. Bien vu. Les conséquences de ces différences de comportement sont utilisées dans le calcul des coefficients de végétation.

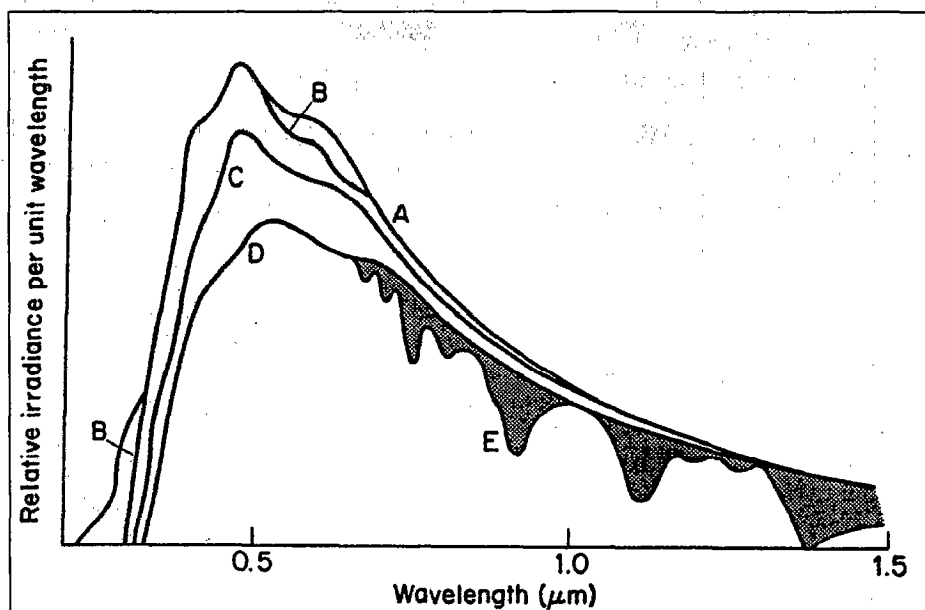


Figure 28 : *Altération du rayonnement solaire lorsqu'il pénètre dans l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde. A) radiations externes; B) après absorption par l'ozone C) après diffusion par les molécules en suspension D) après diffusion par les aérosols (petites particules en suspension) E) après diffusion et absorption par la vapeur d'eau et l'oxygène (extrait de Montheil J.L. et Unsworth M.H., 1990)*

Lors de la traversée de l'atmosphère, l'absorption, qui est due aux différents gaz présents et aux particules en suspension, s'effectue dans toutes les longueurs d'onde, mais avec des particularités associées à la nature des obstacles et des longueurs d'onde. L'absorption par l'ozone concerne principalement les courtes longueurs d'onde (inférieures à 300 nm), l'oxygène agit sur une bande étroite centrée sur 420 nm, le dioxyde de carbone modifie deux bandes respectivement centrées sur 2750 nm et 4250 nm, mais c'est surtout l'absorption par la vapeur d'eau qui est importante. Elle concerne les longueurs d'onde comprises entre 1000 et 2000 nm.

Lors de la modification de la structure de la lumière dans l'atmosphère, les processus d'absorption ne sont pas les seuls en cause. La diffusion (changement de direction mais aussi modification éventuelle de la longueur d'onde), qui dépend de la turbidité de l'atmosphère, joue un rôle important. On distingue plusieurs formes de diffusion, dont :

- La diffusion de Rayleigh. C'est la diffusion par des particules de très faibles dimensions comme les molécules. Cette diffusion est sélective. La couleur bleue du ciel est à mettre à son actif.
- La diffusion de Mie. Elle est due aux gouttes d'eau en suspension (pluies, nuages, brouillards...). Toutes les longueurs d'onde sont affectées, d'où la couleur blanchâtre des nuages. Voir aussi l'arc-en-ciel¹³.

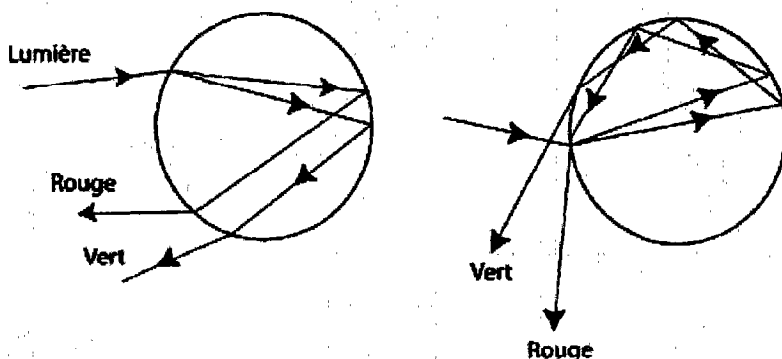


Figure 29 : *Interférence de la lumière et d'une goutte d'eau : cas de l'arc-en-ciel. Souvent, l'arc-en-ciel est double, composé de deux arcs inversés. L'un correspond à une seule réflexion à l'intérieur de la goutte d'eau, l'autre à deux réflexions.*

Remarque : le changement de nature de la lumière (changement de la répartition sur la gamme des longueurs d'onde) peut théoriquement perturber le suivi de certains bilans (c'est le cas si l'on ne s'intéresse qu'à une bande très étroite du spectre).

5.5.2 Le rayonnement solaire 2 : les trajectoires du soleil

Donc le soleil¹⁴. A la surface terrestre, le rayonnement va dépendre de nombreux facteurs, entre autres de la position de l'astre dans le ciel. Cette position

¹³Bacon Roger, 1220-1294 : surnomé le Docteur admirable. L'un des premiers à donner une explication correcte du phénomène. A ne pas confondre avec Bacon Francis, 1561-1626 : « L'hérétique n'est pas celui que le bûcher brule, mais celui qui l'allume ». D'autant que la remarque du second peut concerner le premier qui passa les dernières années de sa vie dans les prisons papales pour thèse dissidente.

¹⁴Contribution à l'année Victor Hugo :

Ô moment solennel ! Les monts, la mer farouche,
Les vents, faisaient silence et cessaient leur clameur
Le vieillard regardait le soleil qui se couche
Le soleil regardait le vieillard qui se meurt.

peut être repérée ou calculée. Différents repères peuvent être utilisés pour caractériser la position du soleil (voir figure 2.2). Des formules permettent de passer d'un système à un autre. Ainsi si l'on note : h sa hauteur, ϕ son azimut, avec ϕ égal à 0 pour le sud, 90° pour l'ouest... , ψ la latitude de l'observateur et η l'angle horaire compté en heure et fractions sexagésimales (bien qu'il s'agisse d'un angle et non d'un temps), δ la déclinaison solaire, on a :

$$\begin{aligned}\sin(h) &= \sin \psi \cdot \sin \delta - \cos \psi \cos \delta \cdot \cos \eta \\ \sin \phi &= -\frac{\cos \delta \cdot \sin \eta}{\cos(h)} \\ \cos(h) \sin \phi &= -\cos \psi \sin \delta + \sin \psi \cos \delta \cos \eta\end{aligned}$$

L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique est l'une des causes majeures de l'inégalité de la durée du jour au cours de l'année. En conséquence, les coordonnées du soleil varient au cours de l'année. Ainsi, lorsque la durée du jour est égale à celle de la nuit, la déclinaison est nulle; elle est maximale le 21 juin et minimale le 22 décembre. On peut calculer δ en ayant recours aux formules suivantes :

$$\sin \delta = \sin(l) \sin \epsilon$$

où l est la longitude du soleil dans le plan de l'écliptique et compté à partir du point vernal

$$l = l_1 + g + 2e \sin(g) + \frac{5e}{4} \sin(2g)$$

$$e = 0,016751 - 4,2 \cdot 10^{-7} N$$

$$g = -0,0266855 - 1,658 \cdot 10^{-4} N + \frac{2\pi t}{365,25}$$

$$N = \text{millésime} - 1900 \quad t : \text{le moment de l'année en jours et fraction du jour:}$$

tandis que ϵ désigne l'obliquité de l'écliptique qui est sensiblement égale à :

$$\epsilon = 0,409319755 - 2,2711 \cdot 10^{-6} N$$

soit approximativement (j étant le jour julien):

$$\delta = 0,39785 - \sin \{4,869 + 0,0172j + 0,03345 \sin(6,224 + 0,0172j)\}$$

(δ est égal à 0 aux équinoxes de printemps et d'automne, à 23,27° au solstice d'été et à -23,27° au solstice d'hiver). On notera que la valeur de h correspondant au zénith est obtenue pour $\eta = 0$. Soit $h = \pi/2 - (\psi - \delta)$. L'ensemble de ces outils permet de suivre la trajectoire du soleil et de placer, par rapport à

cette trajectoire, les observations sur les flux d'énergie que l'on peut effectuer à un moment donné et finalement d'effectuer un bilan énergétique annuel pour une culture particulière.

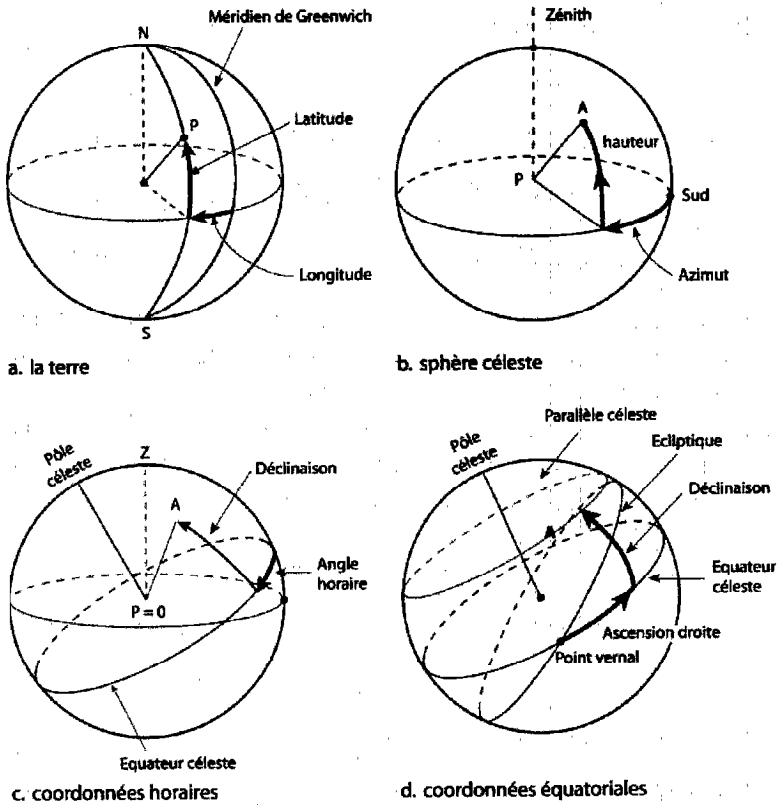


Figure 30 : Bases de la caractérisation de la position relative du soleil à partir des coordonnées angulaires.

a. La position d'un individu situé en un point M sur la Terre est déterminée par sa longitude (angle entre le méridien de M et le méridien de Greenwich) et sa latitude φ (angle entre la verticale en M et le plan de l'équateur).

b. La position d'un astre A , vu de M , est déterminée par son azimut ϕ et sa hauteur h . Ces coordonnées sont mesurées dans un système construit autour du plan horizontal et de la verticale en M . La sphère sur laquelle on positionne A est dite la sphère locale.

c. Par suite de la rotation de la Terre, au cours de la journée, A se déplace par rapport à M . Pour caractériser ce déplacement apparent, on se réfère à une sphère, dite céleste, en rotation autour de l'axe du monde (axe de rotation

de la terre). Sur cette sphère, A est repéré par l'angle horaire η (défini par rapport au méridien de la sphère céleste qui passe par les pôles et le zénith en M) et la déclinaison δ . Remarque : si la déclinaison de A est indépendante de M , il n'en est pas de même de l'angle horaire.

d. Le plan de référence est toujours le plan de l'équateur céleste. L'ascension droite A_d remplace l'angle horaire. L'ascension droite est mesurée par rapport à un point fixe, le point vernal, qui est situé à l'intersection entre l'équateur et le plan de l'écliptique (plan de la rotation de la Terre autour du soleil). On a $\delta = T_s - \lambda - A_d$ où T_s est l'angle horaire du point vernal (par rapport au méridien de Greenwich) et λ la longitude de l'observateur.

Sur cette base, on peut aborder de manière calculatoire une évaluation du rayonnement reçu en un point donné à un instant t . A cette fin, on distingue : le rayonnement extra-atmosphérique, le rayonnement après la traversée de l'atmosphère et enfin le rayonnement au sol (après la traversée de la végétation).

5.5.3 Le rayonnement solaire 3 : l'altération du rayonnement

En dépit des fluctuations de l'activité nucléaire du soleil et des variations de la distance Terre-soleil, l'énergie incidente qui atteint la couche supérieure de l'atmosphère peut être considérée comme constante ou presque. Mesurée, à l'extérieur de l'atmosphère, sur un plan perpendiculaire aux rayons du soleil, elle est sensiblement égale à 1370 W m^{-2} . Rapportée à la surface au sol, et en tenant compte de la sphéricité de la Terre, on obtient en moyenne 350 W m^{-2} (voir 6.3). Ces valeurs sont parfois discutées par les spécialistes. Mais d'une façon générale la démarche est la suivante : on considère que le soleil se comporte comme un corps noir à une température d'environ $T = 5800^\circ \text{K}$. Son exitance est donc égale à $M = \sigma T^4$ (voir 5.4). Connaissant le rayon R_s du soleil, on peut estimer la puissance totale rayonnée, soit $M(4\pi R_s^2)$. Si l'on considère que la distance moyenne entre le soleil et la Terre est d'environ $D_{ST} = 149,5 \cdot 10^6 \text{ km}$ ($\pm 3,3\%$) on obtient l'éclairement moyen extra-terrestre

$$\frac{4\pi R_s^2 M}{4\pi D_{ST}^2} \simeq 1370 \text{ W m}^{-2}$$

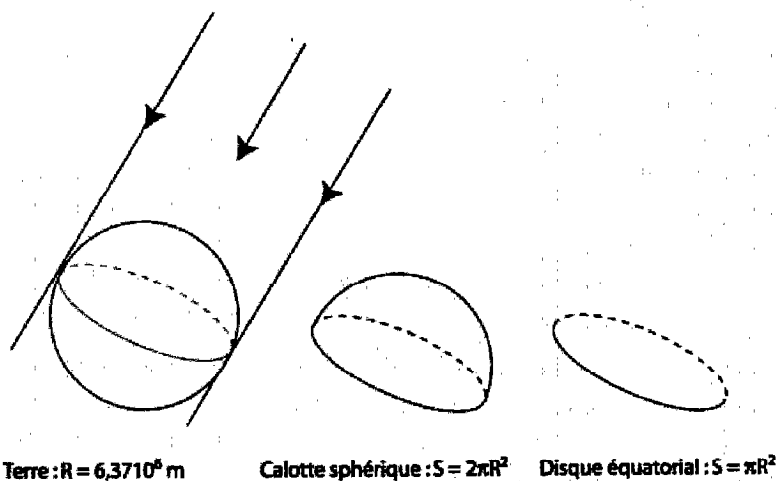


Figure 31: Ah ! s'il n'y avait pas la Terre, on serait heureux.

Les radiations associées à l'activité lumineuse ont des longueurs d'onde comprises entre 0,1 nm et plusieurs kilomètres (toutefois à ce stade on ne parle plus de lumière). On a déjà noté que, dans ce large spectre, l'énergie radiative était très inégalement répartie. Dans l'atmosphère, elle est transmise, réfléchi, diffusée, absorbée avec ou sans changement de longueur d'onde (rayonnement) et avec des intensités qui sont fonction de l'état de l'atmosphère (nuages, pollution...), de la latitude, de la saison, de l'heure... Aussi, au-dessus des systèmes de surface (sol, végétation, eau), l'énergie disponible est-elle inférieure à l'énergie incidente qui rentre dans l'atmosphère et le rayonnement lui-même a changé non seulement d'intensité mais aussi de nature. Cette évolution a son importance car chaque catégorie de longueurs d'onde a, ou peut avoir, des fonctions très particulières.

Voyons. Le soleil émet un flux de l'ordre de $R_c = 1370 \text{ Wm}^{-2}$. Cette valeur est sensiblement constante tout au long de l'année, mais peut être corrigée pour tenir compte du caractère elliptique de l'orbite terrestre autour du soleil :

$$R_o(j) = R_c [1 + 0,034 \cos(2\pi.j/365)] \quad R_o \text{ le flux au-dessus de l'atmosphère}$$

Une fois dans l'atmosphère, le rayonnement subit de nombreuses perturbations (réflexion, diffusion, absorption). Les pertes d'énergie dépendent de l'état de l'atmosphère et plus exactement d'un paramètre τ qui est censé en traduire la transmissivité ($0,5 \leq \tau \leq 0,8$). On admet que le flux après avoir traversé l'atmosphère est sensiblement égal à R_a :

$$R_a = R_o \tau^m \quad R_a \text{ le flux mesuré perpendiculairement à sa direction}$$

Le coefficient

$$m = \sqrt{1229 + (614 \sin(h))^2} - 614 \sin(h)$$

baptisé "distance optique relative" prend en compte la non-rectitude de la transmission de la lumière du soleil vers la surface terrestre. Le rayonnement direct, que l'on peut mesurer au dessus du couvert et qui passe pour partie au travers des trouées, est égal à $R_a \sin(h)$.

Au-delà du rayonnement direct que nous venons d'évoquer, il convient de tenir compte du rayonnement indirect (diffus). Plusieurs propositions ont été faites par les spécialistes qui distinguent généralement les ciels clairs (faible diffusion atmosphérique) des ciels couverts (forte diffusion atmosphérique).

Pour un ciel clair, la distribution du rayonnement diffus n'est pas homogène. En effet, on observe que les portions de ciel proches du soleil sont plus lumineuses que celles situées à l'orthogonale de cette position (de 4 à 10 fois plus importantes). Une formule approchée permet d'évaluer la part totale diffusée en fonction de la transmissivité τ et de la hauteur du soleil h :

$$R_d = R_o(0,271 - 0,294\tau^m) \sin(h)$$

Mais cette formule ne donne pas d'éléments pour distribuer spatialement le flux. En présence d'un ciel couvert, on fait souvent l'hypothèse que la répartition est uniforme. Soit pour une direction \vec{D} :

$$R_{\vec{D}} = R_d/\pi$$

D'une façon plus générale, on peut supputer une loi de répartition qui s'ajuste aux variations les plus visibles. Exemple : le rayonnement diffus dans la direction de hauteur h peut être approché par la formule suivante (cette formule dite "standart overcast sky" ou loi de Moon et Spencer est utilisable par ciel clair ou couvert) :

$$R_d(h) = R_d(h_z)(1 + 2 \sin(h))/3 \quad h_z \text{ l'angle qui correspond au zénith}$$

Formule qui n'a pas de prétention à l'universalité car il existe bien d'autres possibilités de modéliser la luminescence céleste¹⁵.

Les indices d'éclairement relatif ou "sites factors". Considérons un couvert végétal particulier : soit une forêt. Les praticiens définissent des indices qui évaluent les proportions de rayonnement, direct ou diffus, qui sont transmises en un point donné situé en dessous du couvert. Ces indices (direct site factor et indirect site factor) varient entre 0 et 1. Le complément à 1 correspond à la proportion de rayonnement interceptée.

¹⁵Bataille Bonnaventure Eugène, 1853-1891 : dit Sapeck, auteur présumé d'un ouvrage visionnaire sur les mille et une manière de garder ses nerfs optiques. Ce qui met un point final à nos vagabondages.

ECLAIRONS LA FORET

6 Le bilan radiatif et l'ambiance lumineuse en forêt

6.1 Les principes généraux des bilans radiatifs

Historiquement, le terme de rayonnement était associé à des phénomènes de propagation pour lesquels la nature des rayons en cause était inconnue. Actuellement, il désigne plus spécifiquement un flux de particules. On distingue, entre autres :

Le rayonnement thermique. Tout corps maintenu à une température constante émet de l'énergie sous forme de rayonnement thermique qui correspond à des longueurs d'onde comprises entre l'infrarouge et l'ultraviolet. Sa composition dépend de la température du corps. Pour un corps noir, elle est proportionnelle à T^4 (voir 6.4).

Le rayonnement calorifique. Il s'agit essentiellement de l'ancienne dénomination des infrarouges.

Le rayonnement PAR. Le rayonnement solaire utilisé par la photosynthèse est situé dans la bande spectrale dite du visible (400 et 700 nm). Seule 20% de l'énergie associée à cette bande est mobilisée par la photosynthèse. Il s'agit du "rayonnement" ou "éclairage utile" : le PAR (photosynthetically active radiation). Il est exprimé en énergie radiative (E_{PAR} mesuré en $W m^{-2}$) ou en nombre de photons (Q_{PAR} mesuré en $mol m^{-2}/jour$). On l'estime compris, au niveau du sol, et selon l'exposition, entre 17500 et 35000 $mW m^{-2}$. Le PAR est porté par un rayonnement incident direct (direction \vec{D}_s du soleil) et un rayonnement diffus (pas de direction privilégiée mais une répartition multidirectionnelle qui peut être hétérogène). La part de l'énergie portée par le rayonnement diffus est comprise entre 15 et 100 % du rayonnement global. Par temps clair, pour des latitudes moyennes et un angle azimutal du soleil de 45°, elle serait d'environ 15 %, par temps couvert de l'ordre de 25 % (Guyot, 1997).

Au niveau du système sol-végétation, le bilan radiatif est établi en comptabilisant le flux incident entrant R_o (direct et diffus), le flux incident intercepté et absorbé par la végétation R_{av} , le flux réfléchi par le sol R_{sav} et intercepté par la végétation, le flux absorbé par le sol R_s et le flux réfléchi dans l'atmosphère par le système sol-végétation R_{sv} . Ces bilans peuvent être comptabilisés dans

des intervalles de longueurs d'onde particuliers (le PAR, le rayonnement thermique, l'infrarouge...voir 6.2.3).

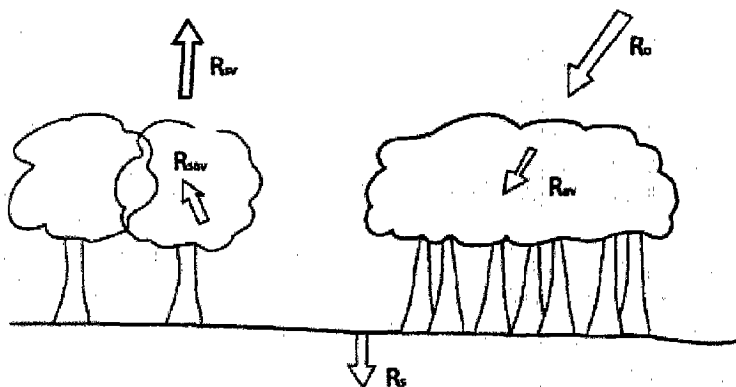


Figure 32 : Les termes du bilan radiatif dans le système atmosphère, végétation et sol. $R_{av} + R_{sav} = R_o - R_s - R_{sv}$

Les termes R_{sav} et R_{sv} sont souvent négligés et dans ces conditions l'énergie absorbée est égale à l'énergie interceptée sur le flux incident. Cette énergie est alors évaluée par l'écart entre les rayonnements mesurés au-dessus du couvert et au sol. Cette approximation est fréquemment utilisée lors des mesures faites à partir du sol. Elle revient à assimiler le sol et les feuilles à des corps noirs.

6.2 Interception du flux incident

Rappel. Le flux rentrant est composé d'un flux direct en provenance du soleil et de direction \vec{D}_s , caractérisé par ses coordonnées angulaires (h_s, ϕ_s) , et d'un flux diffus. D'autre part on considère que le couvert est organisé selon le gradient associé à l'indice foliaire $L(z)$, avec $L(\text{sommet du couvert}) = 0$ et $L(\text{au sol}) = LAI$.

Au niveau L , le rayonnement direct R_{DL} présent est proportionnel à la fraction de trouées $P_0(\vec{D}_s, L)$ et si R_{D0} mesure la valeur du flux direct au-dessus de la canopée, R_{DL} a pour valeur

$$R_{DL} = R_{D0} \cdot P_0(D_s, L) \quad (13)$$

Si, à ce même niveau, on désigne par L_s la surface foliaire éclairée par le rayonnement direct, on peut considérer qu'elle est complémentaire de la fraction de trouées et écrire :

$$1 - P_0(\vec{D}_s, L) \simeq \frac{G(h_s, \phi_s)}{\sin(h_s)} L_s$$

On en déduit l'expression de la part de flux direct reçue au niveau L par unité de surface éclairée :

$$R_{D0} - R_{DL} = R_{D0}(1 - P_0(\vec{D}_s, L))$$

En ce qui concerne le rayonnement diffus et, dans la mesure où il n'y a pas de direction privilégiée, pour chaque direction particulière, la valeur du rayonnement diffus qui atteint le niveau L , soit R_{dL} , est proportionnelle à la fraction de trouées et à l'intensité du rayonnement. Sur l'ensemble de l'hémisphère, le rayonnement cumulé ne peut être obtenu qu'en intégrant les valeurs associées à toutes les directions \vec{D} . Pour ce faire, il faut connaître la répartition du rayonnement diffus, c'est-à-dire la fonction de densité de la luminance $L_s(\vec{D})$ du ciel (voir 6.3.1) :

$$R_{dL} = \int_{\vec{D}} L_s(\vec{D}) P_0(\vec{D}, L) \sin(h) d\Omega(\vec{D}) \quad \text{avec } h \text{ la hauteur de } \vec{D} \quad (14)$$

$R_{DL} + R_{dL}$ est le rayonnement total qui atteint le niveau L .

Connaissant cette valeur pour $L = 0$ et pour $L = LAI$, on obtient par différence l'énergie absorbée par le couvert.

flux de radiation absorbé entre 0 et $L = R_{D0} + R_{d0} - R_{DL} + R_{dL}$

Remarque : en effectuant des mesures en forêt et hors forêt (ces dernières remplacent les mesures au dessus du couvert) on peut établir le bilan et en déduire l'énergie absorbée et la valeur de l'indice foliaire. La difficulté est d'obtenir une évaluation ou une modélisation de $L(\vec{D})$. Si le ciel est clair, la distribution du rayonnement diffus n'est pas uniforme mais dépend de la portion hémisphérique considérée. On rappelle que les portions de la voûte céleste proches du soleil sont 4 à 10 fois plus lumineuses que celles situées à 90° dans le plan vertical constitué par la direction du soleil \vec{D}_s et son zénith (voir 6.3.2 : le rayonnement solaire 2).

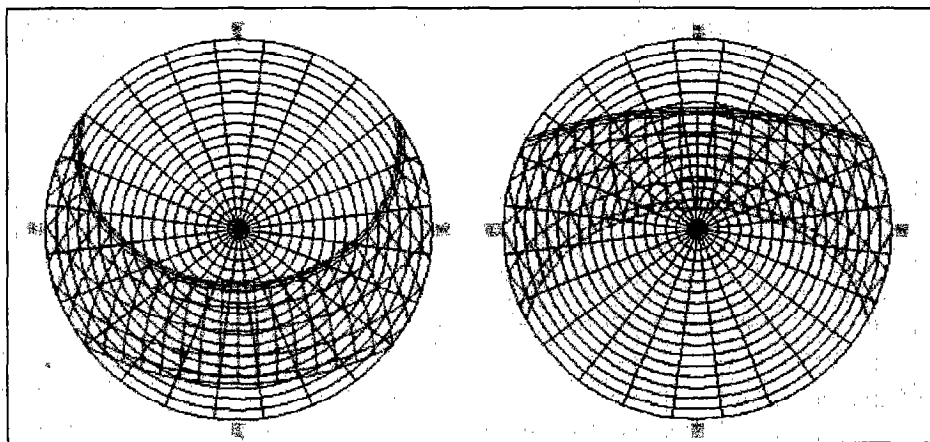


Figure 33 : *Parcours solaire annuel. A gauche Paris (48,87° nord, 2,23° sud), à droite Sydney (39,92° sud, 151,15° est)*

6.3 Les flux internes au couvert végétal

Lorsqu'un faisceau lumineux \vec{D} rencontre une feuille, il est pour partie absorbé et pour partie diffusé, soit par réflexion, soit par transmission. Bien évidemment, cette répartition est fonction des propriétés optiques des feuilles et de l'angle d'incidence entre \vec{D} et \vec{n} la normale à la feuille.

Les études expérimentales sur le comportement des feuilles sont relativement peu nombreuses et limitées à quelques espèces de grande culture. D'autant que ces études pour être complètes sont longues et qu'il faudrait, en toute rigueur, tenir compte du degré de maturité de la feuille, de son état sanitaire, mais aussi de la nature de la lumière. Aussi a-t-on souvent recours à des modèles simples (voir 6.2).

Du strict point de vue conceptuel, pour aborder le comportement de la lumière dans le sous-bois, il est nécessaire de décomposer le cheminement d'un rayon incident quelconque, soit \vec{D}_o , dans le feuillage, puis de suivre sa transformation, lorsqu'il n'est pas absorbé, en un rayon \vec{D} , réfléchi ou transmis. Pour ce faire on va tenter de structurer la probabilité qu'un rayon \vec{D}_o soit intercepté puis diffusé dans une direction contenue dans l'angle solide élémentaire $d\Omega(\vec{D})$. C'est un véritable flipper ! A cette fin, on introduit les évènements suivants (Prévot L., 1985) :

- **A** : le rayon \vec{D}_o est intercepté par une feuille
- **R et T** : le rayon \vec{D}_o est réfléchi (*R*) et/ou transmis (*T*)

- **D** : la diffusion se fait dans l'angle solide $d\Omega(\vec{D})$

Sur cette base descriptive, on introduit une fonction dite "de phase surfacique" : $\Gamma(\vec{D}_o, \vec{D})$ qui va permettre de calculer la répartition du rayonnement diffusé dans le couvert. Autrement dit la proportion de flux arrivant dans la direction \vec{D}_o et diffusé dans la direction \vec{D} . Cette fonction va dépendre de l'organisation du feuillage, et en particulier de la répartition des normales \vec{n} , elle est donc construite sur la connaissance des fonctions $\Gamma_{\vec{n}}(\vec{D}_o, \vec{D})$, considérées dans l'expression de la réflexion ($\vec{D} \cdot \vec{n} \geq 0$) ou de la transmission ($\vec{D} \cdot \vec{n} \leq 0$) face à des feuilles d'inclinaison \vec{n} :

$$\vec{D} \cdot \vec{n} \geq 0 \implies \frac{\Gamma_{\vec{n}}(\vec{D}_o, \vec{D})}{\pi} d\Omega(\vec{D}) = P(\mathbf{D} | \mathbf{R} \cap \mathbf{A}) P(\mathbf{R} | \mathbf{A}) P(\mathbf{A})$$

$$\vec{D} \cdot \vec{n} \leq 0 \implies \frac{\Gamma_{\vec{n}}(\vec{D}_o, \vec{D})}{\pi} d\Omega(\vec{D}) = P(\mathbf{D} | \mathbf{T} \cap \mathbf{A}) P(\mathbf{T} | \mathbf{A}) P(\mathbf{A})$$

Remarque : la valeur π par laquelle on divise $\Gamma_{\vec{n}}(\vec{D}_o, \vec{D})$ n'est qu'un artefact qui sert à normer la fonction. On évoquera, plus loin, son origine.

Pour obtenir $\Gamma(\vec{D}_o, \vec{D})$, il faut considérer toutes les orientations possibles des feuilles, donc intégrer par rapport à \vec{n} , c'est-à-dire par rapport à $g(\alpha, \varphi)$.

$$\Gamma(\vec{D}_o, \vec{D}) = \int \Gamma_{\vec{n}}(\vec{D}_o, \vec{D}) g(\alpha, \varphi) d\alpha d\varphi$$

Cette fonction Γ va permettre de redistribuer le rayonnement. Si $R(\vec{D}_o, L)$ désigne le rayonnement présent au niveau L dans la direction \vec{D}_o , alors :

$$\frac{1}{\pi} \int \Gamma(\vec{D}_o, \vec{D}) R(\vec{D}_o, L) d\Omega(\vec{D}_o)$$

représente la part de l'ensemble du rayonnement interceptée et renvoyée dans la direction \vec{D} . On a donc en main un outil, au moins conceptuel, pour redistribuer les entrées dans une direction de sortie \vec{D} .

La difficulté est de donner des expressions crédibles aux différentes probabilités qui rentrent dans la composition de $\Gamma_{\vec{n}}(\vec{D}_o, \vec{D})$, puis d'intégrer. C'est une entreprise analytique a priori titanesque que l'on aborde par les voies pénétrables du numérique.

- Etude d'un cas particulier.

On est en présence d'un feuillage pour lequel les feuilles ont une inclinaison constante α et une distribution des azimuts uniforme. D'autre part,

on suppose que la feuille se comporte comme une surface qui réfléchit ou qui transmet la lumière de manière uniforme dans le plan (\vec{D}, \vec{n}) (modèle dit bi-lambertien qui impose de prendre $P(\mathbf{R} | \mathbf{A})$ et $P(\mathbf{R} | \mathbf{T})$ constants).

On a : $P(\mathbf{A}) = |\vec{D}_o \cdot \vec{n}|$, $P(\mathbf{R} | \mathbf{A}) = r$ et $P(\mathbf{R} | \mathbf{T}) = t$ (r et t étant deux probabilités qui dépendent de la nature de la feuille), enfin $P(\mathbf{D} | \mathbf{R} \cap \mathbf{A})$ ou $P(\mathbf{D} | \mathbf{T} \cap \mathbf{A}) = \frac{|\vec{D} \cdot \vec{n}|}{\pi} d\Omega(\vec{D})/\pi$ (on trouve ici la justification de la division de Γ par π).

$$\Gamma_{\vec{n}}(\vec{D}_o, \vec{D}) = r |(\vec{D}_o \cdot \vec{n})(\vec{D} \cdot \vec{n})| \quad \text{ou} \quad t |(\vec{D}_o \cdot \vec{n})(\vec{D} \cdot \vec{n})|$$

$$\Gamma(\vec{D}_o, \vec{D}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Gamma_{\vec{n}}(\vec{D}_o, \vec{D}) d\varphi$$

On notera la symétrie en \vec{D}_o et \vec{D} .

$$\text{remarque : } \frac{1}{\pi} \int_{\vec{D}} \Gamma(\vec{D}_o, \vec{D}) d\Omega(\vec{D}) = (r + t)P(\mathbf{A})$$

Dans certaines situations simples, $\Gamma(\vec{D}_o, \vec{D})$ est calculable. C'est en particulier le cas lorsque $h_o \geq \alpha$ et $h \geq \alpha$, mais généralement son évaluation nécessite le recours à des méthodes numériques. Cette dernière expression de la fonction de phase traduit indirectement la relation de cette fonction avec les variations de l'intensité foliaire à un niveau donné, soit la dérivée de $P(A)$ et la nature des feuilles (r et t).

6.4 Bilan radiatif

Pour obtenir un bilan radiatif complet et détaillé, il faut tenir compte du flux incident, qu'il soit direct ou diffusé, et de la rediffusion qui s'opère dans le système végétal. Dans ces conditions, si l'on cherche à déterminer les variations de flux dans une direction \vec{D} entre les niveaux caractérisés par les valeurs d'indice foliaire L et $L + dL$, on va devoir cumuler :

1. la perte associée à la diminution que connaît la fraction de trouées entre L et $L + dL$ et qui entraîne une diminution correspondante du flux de direction \vec{D} de hauteur h (voir 3.4.1),

$$\frac{dP_0(h)}{P_0(h, L)} = -\frac{G(h)}{\sin(h)} dL \implies \frac{dR(\vec{D}, L)}{R(\vec{D}, L)} = -\frac{G(h)}{\sin(h)} dL$$

2. l'apport associé à la diffusion provoquée par le couvert et qui concerne le flux intercepté et non absorbé. Ce flux peut venir de toutes les directions \vec{D}' (attention : dans le cas présent, h' peut varier entre $-\pi/2$ et $\pi/2$ car le flux peut venir dans la tranche dL par en dessus comme par en dessous), mais n'est comptabilisé, en sortie, que dans la direction \vec{D}

$$dR(\vec{D}, L) = \left[\frac{1}{\pi} \int_{\vec{D}'} \Gamma(\vec{D}', \vec{D}) R(\vec{D}', L) d\Omega(\vec{D}') \right] dL$$

Dans ce contexte, la variation de flux entre les niveaux L et $L + dL$ s'écrit en cumulant la part interceptée et la part rediffusée :

$$\frac{dR(\vec{D}, L)}{dL} = -\frac{G(h)}{\sin(h)} R(\vec{D}, L) + \frac{1}{\pi} \int \Gamma(\vec{D}', \vec{D}) R(\vec{D}', L) d\Omega(\vec{D}')$$

Si l'on suppose connues $G(h)$ et $\Gamma(\vec{D}', \vec{D})$, ce qui, on vient de le voir, est loin d'être acquis, il faudra résoudre cette équation différentielle. Cette dernière opération sera de toute façon (quelle que soit la modélisation de la structure du feuillage) soit impossible, soit très difficile. Dans un tel contexte, la démarche classique est d'opérer un retour vers la discrétisation du modèle. Cette discrétisation est double. Elle concerne, la voûte céleste que l'on découpe en angles solides élémentaires $d\Omega(\vec{D}_k)$ ($k = 1, 2, \dots, n$) et le couvert végétal que l'on réduit en un nombre de couches homogènes et simples. Double et même triple discrétisation puisqu'il aura fallu auparavant discrétiser la fonction $g(\alpha, \varphi)$. Finalement, on obtient un système différentiel de n équations et n inconnues.

$$\frac{dR(\vec{D}_k, L)}{dL} = -\frac{G(h_k)}{\sin(h_k)} R(\vec{D}_k, L) + \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^{j=n} \left[\frac{\Gamma(\vec{D}_j, \vec{D}_k)}{\sin(h_k)} R(\vec{D}_j, L) d\Omega(\vec{D}_j) \right]$$

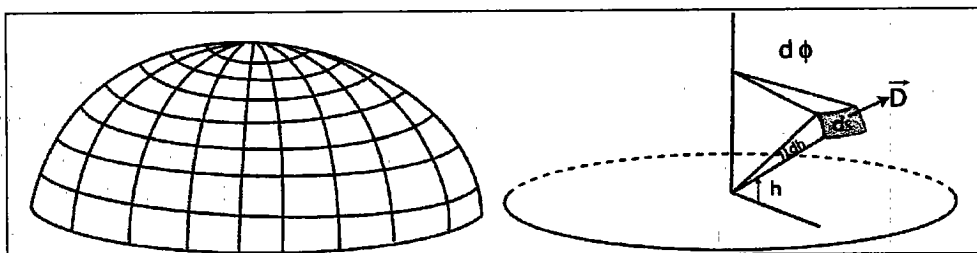


Figure 34 : Discretisation de la voûte céleste

La variation du flux directionnel se lit comme la somme de l'interception directe et de la rediffusion dans le couvert et s'écrit matriciellement sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \frac{dR(\vec{D}_1, L)}{dL} \\ \frac{dR(\vec{D}_2, L)}{dL} \\ \vdots \\ \frac{dR(\vec{D}_n, L)}{dL} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{G(h_1)}{\sin(h_1)} R(\vec{D}_1, L) \\ \frac{G(h_2)}{\sin(h_2)} R(\vec{D}_2, L) \\ \vdots \\ \frac{G(h_n)}{\sin(h_n)} R(\vec{D}_n, L) \end{bmatrix} + \left[\frac{\Gamma(\vec{D}_j, \vec{D}_i)}{\sin(h_i)} \right] \begin{bmatrix} R(\vec{D}_1, L) d\Omega(\vec{D}_1) \\ R(\vec{D}_2, L) d\Omega(\vec{D}_2) \\ \vdots \\ R(\vec{D}_n, L) d\Omega(\vec{D}_n) \end{bmatrix}$$

La résolution de ce système différentiel permet de connaître les valeurs des $R(\vec{D}_k, L)$.

Modèle simplifié dit de Kubelka et Munk

L'idée est de considérer que les radiations qui interviennent dans le bilan de la couche $[L, L + dL]$ peuvent être décomposés en

les rayonnements direct et diffus R_D et R_d qui pénètrent au niveau L sans avoir été interceptés au préalable par le couvert

les rayonnements qui atteignent la couche $[L, L + dL]$ après avoir été diffusé dans le couvert et que l'on décompose en un rayonnement ascendant R_- et un rayonnement descendant R_+ . Cette base de discrétisation va concerner tout autant les entrées que les sorties. D'autre part, on va respecter la forme linéaire des équations et leur structure générale. Cette approche conduit l'expérimentateur à considérer le système suivant :

$$\begin{aligned} \frac{dR_+(L)}{dL} &= -aR_+(L) + \sigma R_-(L) + s' [R_D(L) + R_d(L)] \\ \frac{dR_-(L)}{dL} &= -\sigma R_+(L) + aR_-(L) + s [R_D(L) + R_d(L)] \\ \frac{dR_D(L)}{dL} &= -KR_D(L) \\ \frac{dR_d(L)}{dL} &= -\bar{K}R_d(L) \end{aligned}$$

avec $K = G(h_s)/\sin(h_s)$, \bar{K} , a et σ les coefficients d'extinction, d'extinction moyen et de diffusion relatifs aux flux diffus et s et s' les coefficients de diffusion vers le bas et vers le haut du rayonnement. Si l'on connaît la valeur des coefficients σ, a, s, s', K , et \bar{K} le système est des plus classique et se résout aisément (Bonhomme R., et Varlet-Grancher C., 1977). La méthode bien que limitée et très simplificatrice est, de l'avis des spécialistes, satisfaisante et fréquemment sollicitée.

7 Conclusion

La connaissance des lois qui régissent les interférences entre un rayonnement lumineux de direction donnée et le couvert, qu'il s'agisse de la distribution des trouées ou du nombre de contacts, est essentiellement une connaissance de nature géométrique. Elle permet d'approcher, avec l'aide de quelques hypothèses, souvent osées, mais ô combien douces, la distribution et l'organisation du couvert, donc d'estimer la densité foliaire, sa répartition spatiale comme son évolution temporelle. En ce sens, l'accent est mis sur la structure du couvert. Le comportement de la lumière qui va interférer avec l'image qui nous parvient et à partir de laquelle nous construisons nos calculs n'est pas intégrée à l'analyse. Rien n'est dit sur la disponibilité de l'énergie lumineuse.

L'approche par le bilan radiatif rejoint les préoccupations qui motivaient la démarche plus géométrique de la méthode des trouées. Aussi, le bilan radiatif permet-il l'estimation du *LAI* et de la répartition angulaire des feuilles. Mais il y a un "plus". Elle informe sur la répartition du rayonnement au sein du couvert, donc partiellement elle renseigne sur le moteur énergétique. Toutefois, ce "plus" a ses limites. D'une part, on est contraint par les difficultés de calcul, d'autre part on n'a pas accès au fonctionnement d'un organe particulier. Quant à la pertinence de la théorie et l'opérationnalité des métrologies associées, elles restent, pour beaucoup, tributaires de considérations globales sur le peuplement étudié.

BIBLIOGRAPHIE

**Cette bibliographie a été réalisée par Nathalie Bréda
et Kamel Soudani**

Albrekston A., 1984 – Sapwood basal area and needle mass of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) trees in Central Sweden. *Forestry*, 57 (1), 35-43

Alexandre D.Y., 1981 – L'indice foliaire des forêts tropicales. Analyse bibliographique. *Acta Oecologica*, 2 (4), 299-312

Anderson M.C., 1964 – Studies of the woodland light climate. I. The photographic computation of light conditions. *Journal of Ecology*, 1964, 52, pp 27-41

Andrieu B., Baret F., 1993 – Indirect methods of estimating crop structure from optical measurements. in: Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Sinoquet H.(Eds.), *Crop structure and light microclimate: characterization and applications*, Sciences Update, INRA Editions, Paris, 1993, pp. 285-322.

Asner G.P., 1998 – Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote sensing of environment* 64:234-253 (1998)

Asner, G.P., Wessman C.A., and Bateson C.A., 1998 – Sources of variability in plant canopy hyperspectral reflectance data in a savanna ecosystem. *Proceedings of the 7th Annual JPL Airborne Earth Science Workshop* 1:23-32.

Asner, G.P., Bateson C.A., Townsend A.R., and Wessman C.A., 1999 – Resolving vegetation condition and biogeochemical processes using hyperspectral BRDF inverse modeling. *Proceedings of the 8th Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*, 37-46.

Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E. T., Hatfield J. L., 1984 – Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in Wheat. *Agronomy Journal*, 76, 300-306.

Asrar G., Kanemasu E.T., Jackson R. D., Pinter P. J., 1985 – Estimation of total above ground phytomass production using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 17, 211-220.

Aussenac G., 1968 – Interception des précipitations par le couvert forestier. *Ann. Sci. For.*, 25 (3), 135-156.

Aussenac G., 1975 – Couverts forestiers et facteurs de climat : leurs interactions, conséquences physiologiques chez quelques résineux. *Thèse de Doctorat*, Nancy, 234 p.

Aussenac G., Ducrey M., 1977 - Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus silvatica* L. et *Quercus sessiliflora* SALISB) de l'Est de la France. I. Analyse des profils microclimatiques et des caractéristiques anatomiques et morphologiques de l'appareil foliaire. *Ann.Sci.For.*, 34, 265-284.

Aussenac G., Boulangeat C., 1980 - Interception des précipitations et évapotranspiration réelle des peuplements de feuillu (*Fagus Sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)). *Ann. Sci. For.*, 37 (2), 91-107.

Aussenac G., Granier A., Bréda N., 1995 - Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. *Rev. For. Fr.* XLVII-1-1995, 54-62

Barclay H.J., Trofymow J.A., Leach R.I., 2000 - Assessing bias from boles in calculating leaf area index in immature Douglas-fir with LICOR canopy analyser. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100 (2000), 255-260

Baret F., 1986 - Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales. Thèse de doctorat, Université de Paris Sud, 182p.

Baret F., Guyot G., Major D., 1989a - TSAVI : a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'90, Vancouver, Canada, 3, 1355-1358.

Baret F., Guyot G. and Major D., 1989b - Crop biomass evaluation using radiometric measurements. *Photogrammetria*, 43, 241-256.

Baret F., Guyot G., 1991 - Potentials and limits of vegetation indices for LAI and PAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35, 161-173.

Baret F., Michael C., Sohbi Y., 1996 - Les mesures de télédétection dans le domaine solaire. Du couvert végétal à la région. Actes de l'Ecole Chercheurs INRA en Bioclimatologie. Le Croisic, 25-29 mars, 1996. Tome 2 : Du couvert végétal à la région, pp. 53-67. INRA- Service des Editions Route de Saint-Cyr F78026 versailles Cedex.

Barthélémy F., Balaise F., Fourcaud T., Nicolini E., 1995 - Modélisation et simulation de l'architecture des arbres : bilan et perspectives. *Revue forestière française*, 1995, numéro spécial Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois, 71-96.

Benallegue M., Normand M., Galle S., Dechambre M., Taconet O., Vidal-Madjar D., Prévot L., 1994 - Soil moisture assessment at a basin scale using active microwave remote sensing : the Agriscatt'88 Airborne Campaign on the Orgeval watershed. *Int. J. Remote Sensing*, 15 (3), 645-656.

Boissard P., Sohbi Y., 1995 - Structure géométrique tridimensionnelle des couverts végétaux. Actes de l'Ecole-Chercheurs INRA en Bioclimatologie. Le Croisic, 3-7 Avril, 1995. Tome 1: De la plante au couvert végétal, pp. 311-348. Département de Bioclimatologie INRA F78850 Thiverval-Grignon.

Bolstad P.V., Gower S.T., 1990 - Estimation of leaf area index in fourteen southern Wisconsin forest stands using a portable radiometer. *Tree Physiology*, 7, 115-124.

Bonhomme R., 1974 - Détermination des profils d'indice foliaire et de rayonnement dans un couvert végétal à l'aide de photographies hémisphériques faites in situ. Thèse de Docteur-ingénieur, présentée à l'université d'Aix-Marseille, 1974, 30 p.

Bonhomme, 1993 - The solar radiation : caracterization and distribution in the canopy. in: Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Sinoquet H.(Eds.), *Crop structure and light microclimate: characterization and applications*, Sciences Update, INRA Editions, Paris, 1993, pp. 17-28.

Bonn F., Rochon G., 1992 - Précis de télédétection. Volume 1, Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec/AUPELF

Bonn F., 1996 - Précis de télédétection. Volume 2, Applications Thématiques. Presses de l'Université du Québec/AUPELF.

Bréda N., 1999 - L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Rev. For. Fr.* LI-2-1999, 135-150.

Bréda N., Granier A., Aussenac G., 1995 - Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). *Tree Physiology*, 1995, 295-306.

Bréda N., Landmann G., 2001 - Inquiries into practices and results gained in countries from European Union. Sub-group " litterfall " from expert panel " Crown condition " of the PIC Forest and European Union

Scheme on the protection of forests against atmospheric pollution, May 2001.

Brix H., Mitchel A.K., 1983 - Thinning and nitrogen fertilization effects on sapwood development and relationships of foliage quantity to sapwood area and basal area in Douglas-fir. *Can. J. For. Res.*, 13, 384-389.

Brown N.D., 1993 - The implications of climate and gap microclimate for seedling growth conditions in a Bornean lowland rain forest. *Journal of Tropical Ecology*, 9, 153-168.

Burton A.J., Pregitzer K.S., Reed D.D., 1991 - Leaf area and foliar biomass relationships in Northern hardwood forests located along an 800 km acid deposition gradient. *Forest Science*, 37(4), 1041-1059.

Botkin D.B., 1986 - Remote sensing of the biosphere, Report of the committee on planetary biology, National Academy of Sciences, Washington DC, USA (1986).

Campbell G.S., 1986 - Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and forest Meteorology*, 36, 317-321.

Campbell G.S., 1990 - Derivation of an angle density function canopies with ellipsoidal leaf angle distributions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49, 173-176.

Campbell G.S., 1981 - Principles of radiation and temperature relations. In O.L. Lange, P.S. Nobel, C.B. Osmond & H. Ziegler (Editors), *Physiological Plant Ecology I. Responses to the physical environment* (Encyclopedia of Plant Physiology, 12 A). Springer, New York, USA

Champion I., Wigneron J.P., Bréda N., 1996 - Variables de fonctionnement issus des données de télédétection micro-onde. Actes de l'Ecole-Chercheurs INRA en Bioclimatologie, Le croisic, 25-29 Mars, 1996. Tome 2 : Du couvert végétal à la région, pp.145-167. INRA-Service des Editions Route de Saint-Cyr F78026 versailles Cedex.

Chartier P., 1967 - Lumière, eau et production de matière sèche de couvert végétal. *Ann. Agron.*, 18 (3), 301-331.

Chartier M., Allirand J.M., Varlet-Grancher C., 1993 - Canopy radiation balance: its components and their measurements. in: Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Sinoquet H.(Eds.), *Crop structure and light*

microclimate: characterization and applications, Sciences Update, INRA Editions, Paris, 1993, pp. 29-45.

Chason J., Baldocchi D., Hutson M., 1991 - A comparison of direct and indirect methods for estimating forest leaf area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 57, 107-128.

Chassagneux P., Choissnel E., 1986 - Modélisation de l'évaporation globale d'un couvert forestier. I- Principes physiques et description du modèle. *Ann. Sci. For.*, 43 (4), 505-520.

Chassagneux P., Choissnel E., 1987 - Modélisation de l'évaporation globale d'un couvert forestier. II- Calibrages et résultats du modèle. *Ann. Sci. For.*, 44 (2), 171-188.

Chen J.M., Black T.A., Adams R.S., 1991 - Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 56, 129-143.

Chen J.M., Black T.A., 1992. - Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell Environ.*, 15, 421-429.

Chen J.M., Cihlar J., 1995 - Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurements of leaf area index using two gap size analysis methods. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 33, 777-787.

Chen J.M., 1996 - Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 80, 135-163.

Chen J.M., Leblanc S.G., 1997 - A 4-scale bidirectional reflection model based on canopy architecture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, 1316-1337.

Chen J.M., Rich P.M., Gower T.S., Norman J.M., Pulmmer S., 1997 - Leaf area index on boreal forests :theory, techniques and measurements. *Journal of Geophysical Research*, 102 (D24), 29, 429-444.

Chen J. M. , Leblanc S. G. , White H. P. 1999 - Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) used for mapping biophysical parameters of boreal forests; *Journal of Geophysical Research. Atmospheres* , Vol. 104 , No 22 , 1999

Chen J.M., Leblanc S. G., 2000 - A Geometrical multiple scattering scheme to be used in geometrical optical models. Soumis à IEEE TGARS (2000).

Choudhury B.J., 1987 - Relationships between vegetation indices, radiation absorption and net photosynthesis evaluated by sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment*, 22, 209-233.

Clevers J. G. P. W., 1986 - The application of a vegetation index in correcting the infrared reflectance for soil background. Symp. on Remote Sensing for Ressources Development and Environmental Management. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 26, 221-226.

Clevers J.G. P.W., 1989 - The application of a Weighted infrared -red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. *Remote Sensing of Environment*, 29, pp 25-37

Cournac L., Dubois M.-A., Chave J., Riéra B., 2000 - Fast determination of light availability and leaf area index in tropical forests. Article soumis à J. of Tropical Ecology

Cutini A., Matteucci G., Mugnozza G.S., 1998 - Estimating of leaf area index with the Li-Cor LAI 2000 in deciduous forests. *Forest Ecology and Management*, 105, 55-65.

Daughtry C.S.T., 1990 - Direct measurements of canopy structure. *Remote Sens. Rev.*, 5, 45-60.

Dawson T.P., Curran P.J., Plummer S.E., 1998 - LIBERTY - Modelling the effects of leaf biochemistry on reflectance spectra. *Remote Sensing Environ.*, 65, 50-60.

Deblonde G., Penner M., Royer A., 1994 - Measuring leaf area index with LI-COR LAI-2000 in pine stands. *Ecology*, 75, 527-531.

Deshayes M., Stach N., Malphettes C.-B., 1997 - Utilisation des images satellitales pour l'observation des défoliations dues au Bombyx Disparate en forêt de Haguenau. Les cahiers du DSF, 1-1998 (La santé des forêts [France] en 1997), Min. Agri, Pêche (DERF), Paris, pp.87-89

Denmead O.T., 1969 - Comparative micrometeorology of a wheat field and a forest of Pinus Radiata. *Agric. For. Meteorol.*, 6, 357-371.

Dhôte J.F., 1995 - Définition de scénarios d'éclaircie pour le hêtre et le chêne. Revue forestière française, numéro spécial "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois", pp. 106-110.

Dreyfus Ph., Bonnet F.R., 1995 - CAPSIS : logiciel de simulation des conduites sylvicoles. Revue forestière française, 1995, numéro spécial "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois", pp. 111-115.

Ducrey M, Huc R., 1999 - Effets de l'éclaircie sur la croissance et le fonctionnement écophysologique d'un taillis de chêne vert. Rev. For. Fr. LI-2-1999, 326-339.

Dufrêne E., Bréda N., 1995 - Estimation of deciduous forest leaf area index using direct and indirect methods. Oecologia , 104, 156-162.

Dupont P. 1990 - Evolution temporelle de la rétrodiffusion radar bande C, causée par l'humidité du sol et par les changements de la morphologie du couvert. Mémoire MSc Géographie, Université de Sherbrooke, Septembre 1990, 49 p.

Easter M.J., Spies T.A., 1994 - Using hemispherical photography for estimating photosynthetic photon flux density under canopies and in gaps in Douglas-fir forests of the Pacific Northwest. Can. J. For. Res., 24, 2050-2058.

Eermak, J., 1998 - Leaf distribution in large trees and stands of the floodplain forest in southern Moravia. Tree physiology, 18, 727-737.

Engman E.T., 1991 - Applications of microwave Remote Sensing of soil moisture for water resources and Agriculture. Remote Sens. Environ., 35, 213-226.

Evans G.C. and Coombe D.E., 1959 - Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate. Journal of Ecology, 47, pp 103-113

Fassnacht K.S., Gower S.T., Norman J.M. and McMurtrie R.E., 1994 - A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. Agricultural and forest Meteorology, 71, pp 183-207

Ferment A., 1999 - Comparaison de différentes méthodes d'estimation de l'environnement lumineux et de description de la structure de la

canopée en forêt dense tropicale humide sur le dispositif de Paracou (Guyane française). Maîtrise de Biologie des populations et des écosystèmes. Université de Paris XI Orsay.

Fournier R.A., Rich P.M., Landry R., 1997- Hierarchical characterization of canopy architecture for boreal forest. *J. Geophys. Res.*, 102, 445-454.

Frazer G.W., Trofymow J.A., Lertzman, 1997 - A method for estimating canopy openness, effective leaf area index, and photosynthetically active photon flux density using hemispherical photography and computerized image analysis techniques. Information Report BC-X-373, Pacific Centre, Victoria B.C, Canada, 73 p.

Gamon J.A., Field C.B., Goulden M.L., Griffin K.L., Hartley A.E., Greeske J., Penuelas J. and Valentini R., 1995 - Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications*, 5, 28-41

Gates D.M., 1980) - *Biophysical Ecology*. Springer, New York, 611 pp.

Hill R., 1924 - A lens for whole sky photographs. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50, pp 227-223

Gastellu-Etchegorry J.P., Demarez V., Pinel V., Zagolski F., 1996 - Modelling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. *Remote Sens. Environ.*, 58, 131-156

Gholz H.L., 1982 - Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest. *Ecology*, 63, 469-481.

Gholz H.L., Ewel K.C., Teski R.O., 1990 - Water and forest productivity. *Forest Ecology and Management*, 30, 59-68.

Goel N.S., Strebel D.E., 1984 - Simple Beta distribution: Representation of leaf orientation in vegetation canopies. *Agronomy Journal*, 76, 800-802.

Goel N.S., Qin W., 1994 - Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation indices and LAI and FPAR: A computer simulation. *Remote Sensing Reviews*, 10, 309-347.

Gond V., de Pury D.G.G., Veroustraete F., Ceulemans R., 1999 - Seasonal variations in leaf area index, leaf chlorophyll, and water

content ; scaling-up to estimate fAPAR and carbon balance in a multilayer, multispecies temperate forest. *Tree Physiology*, 19, 673-679

Graetz R.D., 1990 - Remote sensing of terrestrial ecosystem structure : an ecologist's pragmatic view. Hobbs, RJ and Mooney, HA, eds, *Remote Sensing of Biosphere Functioning*, Springer, Heidelberg, pp 5-30.

Granier A., 1981 - Etude des relations entre la section du bois d'aubier et la masse foliaire chez le douglas (*Pseudotsuga menzeisii* mirb. franco). *Ann. Sci. For.*; 38; 503-512.

Granier A, Huc R., Barigah S.T., 1996 - Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factores. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78, 19-29.

Granier A., Bréda N., Biron, P., Villette S., 1999. - A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116, 269-283.

Granier A., Loustau D., Bréda N., 2000 - A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Ann. For. Sci.* 57 (2000) 755-765

Grégoire-Himmler C., 1992 - Détermination de l'indice foliaire par photographie hémisphérique et indice de végétation satellitaire. Mémoire de fin d'études à l'Ecole Nationale de Génie de l'Eau et de l'Environnement, Strasbourg, 1992.

Grégoire-Himmler C., 1995 - Etude de l'hétérogénéité sub-pixellaire des milieux naturels observés par radiométrie spectrale: application à la modélisation de l'état de l'activité de la végétation. Thèse de Doctorat à l'Université Louis Pasteur Strabourg. Juin 1995, 189 p

Grier C.C, Running S.W., 1977 - Leaf Area of mature northwestern coniferous forests : relation to site water balance. *Ecology*, 58, 893-899

Grier C.C., Lee K.M., Archibald R.M., 1984 - Effects of urea fertilization on allometric relations in young Douglas-fir trees. *Can. J. For. Res.*, 14, 900-904.

Goward S.N., Tucker C.J., Dye D.G., 1985 - North American vegetation patterns observed with NOAA-7 advanced very high resolution radiometer. *Vegetatio*, 64, 3-14

Gower S.T., Norman J.M., 1991 - Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad leaf plantations. *Ecology*, 72 (5), 1896-1900.

Gower S.T., Kucharik C.J., Norman J., 1999 - Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sens. Environ.*, 70, 29-51.

Guo B. and Peyron J.L., 1995 - Optimisez la sylviculture à long terme des peuplements forestiers équiennes grâce au logiciel SYLOPT. *Revue forestière française*, 1995, numéro spécial "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois", pp. 120-130.

Guyot G., 1989 - Signatures spectrales des surfaces naturelles. *Collection télédétection N°5*, 178 p.

Guyot G., Guyon D., Riom J., 1989 - Factors affecting the spectral responses of forest canopies : A review. *Geocarto International*, 3, 3-17.

Guyot G., 1997 - *Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes*. Editions Masson, 505 p.

Guyot G., Riom J., 1988 - Review of factors affecting Remote Sensing of forest canopies. *Proceedings : Seminar on Remote Sensing of forest decline attributed to air pollution*. IASA Laxenbourg, Austria. Edition Power Research Institute, 1988.

Halldin S., 1985 - Leaf and Bark area distribution in a pine forest. Hutchison B.A. and Hicks B.B. (eds), *The Forest-Atmosphere Interaction*, Reidel Publishing Company, 39-58.

Hassika P., Berbigier P., Bonnefond J. M., 1997. Measurement and modelling of the photosynthetically active radiation transmitted in a canopy of maritime pine. *Ann. Sci. For.*, 54 : 715-730.

Herbert T.J., 1987 - Area projections of fisheye photographic lenses. *Agricultural and Forest Meteorology*, 39, 215-223.

Hoffer R.M., 1978 - Biological and physical considerations in applying computer aided analysis techniques to remote sensor data. *Remote Sensing : The quantitative approach*. Editors Swain P.H., Davis S.M., McGraw-Hill book Company, pp 227-289.

Howell T.A., Meek D.W., Hatfield J.L., 1983 - Relationship of photosynthetically active radiation to shortwave radiation in the San Joaquin Valley. *Agric. Meteorol.*, 28, 157-175.

Huete A.R., 1988 – A Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309

Hutchison B.A., Matt D.R., McMillen R.T., 1980 – Effects of sky brightness distribution upon penetration of diffuse radiation through canopy gaps in a deciduous forest. *Agric. Meteorol.*, 22, 137-147.

Jacquemoud S., Govaerts Y., Ustin S.L., Frangi J.P., 1997 – Three dimensional representation of leaf anatomy - Application of photon transport, in *Proc. 7th Int. Sym. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel (France), 7-11 April 1997, A.A. Balkema (Rotterdam, Netherlands), pp.295-302.

Jacquemoud S., Baret F., 1990 – PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sens. Environ.*, 34, 75-91.

Jacquemoud S., Ustin S.L., 2001 – Leaf optical properties: A state of the art, in *Proc. 8th Int. Symp. Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing*, Aussois (France), 8-12 January 2001, CNES, pages 223-232.

Jappiot M., Haak H, Lacaze B., 1990 – Etude par télédétection des variations inter-annuelles de l'indice foliaire d'un taillis de châtaigniers dans les Cevennes. *Bul.Soc.Ét Sc.Nat.Nimes et Gard-1995-Tome60*, 22-29. –

Jarvis P.G., Leverenz J.W., 1983. – Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests. In *physiologica Plant Ecology IV*. Encyclopedia of plant physiology. Vol.12D, pp. 233-280. Lange O.L., et al. (eds). Springer-Verlag, New-York.

Johnson J.D., 1984 – A rapid technique for estimating total surface area of pine needles. *Forest science*, 30 (4), 913-921

Kreith F., Kreider J.F., 1978 – Principles of solar engineering. Mc Graw Hill, New york, USA.

Kruijt B., 1989 – Estimating canopy structure of an oak forest at several scales. *Forestry*, 62, 269-284

Krüssmann G., 1979 – Die nadelgehölze. 3. Auflage. Verlag Paul Parey-Berlin und Hamburg, 264 p.

Kübner R., Mosandl R., 2000 - Comparison of direct and indirect estimation of leaf area index in mature Norway spruce stands of eastern Germany. *Can. J. For. Res.*, 30: 440-447

Kucharik C.J., Norman J.M., Murdock L.M., Gower T.S., 1997 - Characterizing canopy nonrandomness with a Multiband Vegetation Imager MVI. *Journal of Geophysical Research*, 102 (D24), 29, 455-473.

Kucharik, C.J., Norman J.M., Gower S.T., 1998 - Measurements of branch and adjusting indirect leaf area index measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91, 69-88.

Kucharik J.C., Norman J.M., Gower S.T., 1999 - Characterization of radiation regimes in nonrandom forest canopies: theory, measurements, and a simplified modeling approach. *Tree physiology* 19, 695-706.

Kuusk A., 1995 - A Markov chain model of canopy reflectance. *Agric. For. Meteorol.* 76, 221-236.

Landsberg J. J., Waring R. H., 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95 : 209-228.

Lang A.R.G., Xiang Y., 1986 - Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 37, 229-243.

Lang A.R.G., 1986 - Leaf Area and Average leaf angle from transmittance of direct sunlight. *Aust. J. Bot.*, 1986, 349-355

Lang A.R.G., 1987 - Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1987, 41, 179-186

Lang A.R.G., 1990 - An instrument for measuring canopy structure *Remote Sensing Reviews*, 5, 61-71

Lang A.R.G., McMurtie R.E., Benson M.L., 1991 - Validity of surface area indices of *Pinus radiata* estimated from transmittance of sun's beam. *Agricultural and Forest Meteorology*, 57, 157-170.

Lang A.R.G., 1993 - Cauchy's theorems and estimation of surface areas of leaves, needles and branches. in: Varlet-Grancher C., Bonhomme R.,

Sinoquet H.(Eds.), Crop structure and light microclimate: characterization and applications, Sciences Update, INRA Editions, Paris, 1993, pp. 175-183.

Leblanc G.S., Chen J.M., Cihlar J., 1997 - NDVI directionality in boreal forests : A model Interpretation of measurements. *Canadien Journal of Remote Sensing*, 23, 368-379

Lee D.W., 1987 - The spectral distribution of radiation in two neotropical rainforests. *Biotropica*, 19, 161-166.

Licor, 1992 - LAI-2000 Plant Canopy Analyser. Operating manual, Licor April 1992.

List R.J., 1984 - Smithsonian meteorological tables. 6th revised edition. Smithsonian Institution Press, Washington D.C., USA.

Loustau D., Cochard H., 1991 - Utilisation d'une chambre de transpiration portable pour l'estimation de l'évaporation d'un sous-bois de pin maritime à molinie (*Molinia coerula* L. Moench) . *Ann. Sci. For.*, 48, 29-45.

Loustau D., Porté A., Bosc A., Sinoquet H., Kruijt B., 1999 - Transpiration et photosynthèse du pin maritime : approches de modélisation du niveau de l'aiguille à l'échelle du couvert. *Rev. For. Fr.* LI-2-1999 ; 266-280.

Loustau D., Berbigier P., Granier A., Brunet Y., Bariac T., Valentini R., 1999 - Mesure du bilan de carbone des forêts européennes : cas des sites français du projet EUROFLUX. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85, 6, 255-264.

Makela A., Virtanen K., Nikinmaa E., 1995 - The effects of ring width, stem position and density on the relationship between foliage biomass and sapwood area in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Can. J. For. Res.*, 25, 970-977

Malingreau J.P., Tucker C.J., Laporte N., 1989 - AVHRR for monitoring global tropical deforestation. *International Journal of Remote Sensing*, 10, 855-867.

Marshall J.D., Waring R.H., 1986 - Comparison of methods of estimating leaf area index in old growth Douglas-fir. *Ecology*, 67, 975-979.

MARIE-F, 1999 - Monitoring and Assessment of Ressources in Europe-Forest. European Commission DG XII, 4th Framework Programme. Theme 3: Space technique applied of environmental monitoring and research. Area 3.1.1: Methodological research. EARS Ltd-Delft, CEMAGREF-ENGREF Montpellier, Finnish Forest Research Institute, Helsinki, Joint Research Centre IRSA-Ispira, University of Freiburg, University of Leicester.

Mass J.M., Vose J.M., Swank W.T., Martinez-Yrizar A., 1955 - Seasonal changes of leaf area index (LAI) in a tropical deciduous forest in west Mexico. *Forest Ecology and Management*, 74, 171-180

McKaughton K.G. and Jarvis P.G., 1983 - Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. Water deficits and plant growth. Kozlowski edition, Academic Press, NY, vol.VII, pp 1-47

McKree K.J., 1972 - Test of current definitions of solar radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.*, 10, 443-453.

McKree K.J., 1981 - Photosynthetically active radiation : In O.L. Lange, P.S. Nobel, C.B. Osmond & H. Ziegler (Editors), *Physiological Plant Ecology I. Responses to the physical environment* (Encyclopedia of Plant Physiology, 12 A). Springer, New York, pp 44-55.

McMurtie, R. E., Gholz, H. L., Linder, S. and Gower, S. T. 1994 - Climatic factors controlling the productivity of pine stands: a model based analysis. *Ecological Bulletins*, 43: 173-188.

Meyer E.B., 1998 - Etude de la structure des canopées forestières à l'aide de photographies hémisphériques zénithales numérisées. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies en Informatique, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 43 p.

Miller J.B., 1967 - A formula for average foliage density. *Aust. J. Bot.*, 15, 141-144.

Miller E.E., Norman J.M, 1971 - A sunfleck theory for plant canopies. I. Lengths of sunlit segments along a transect. *Agronomy Journal*, 63, 735-738.

Mitchel P.L., Whitmore T.C., 1993 - Use of hemispherical photographs in forest ecology : calculation of absolute amount of radiation beneath canopy. Botany School, Geography Department, Cambridge, 39 p.

Monsi M., Saeki T., 1953 - Über den Lichtfactor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Jpn. J. Bot., 1953, 14, 22-52.

Monteith J.L., 1973 - Principles of Environmental Physics. Series of students text in Contemporary Biology, Editors: Professor E. J. W Barrington, F.R.S., Professor Arthur J. Willis. Edward Arnold, 241 p.

Monteith J.L., 1977 - Climate and efficiency of crop production in Britain. Phil. Trans. R. Soc. London, 281 : 277-294.

Moon P., Spencer D.E., 1942 - Illumination from a non-uniform sky. Trans. Illum. Eng. Soc., 37, 707-726.

Morel A., Smith R.C., 1974 - Relation between total quanta and total energy for aquatic photosynthesis. Limno. Oceanogr., 19, 591-600..

Morrison, I.K. 1991 - Effect of trap dimensions on mass of litterfall collected in an Acer saccharum stand in northern Ontario. Can. J. For. Res. 21(6): 939-941.

Muller E., 1995 - Phénologie forestière révélée par l'analyse d'images thematic mapper. C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la vie/Life sciences, 318, 993-1003

Myneni, R.B., Asrar, G. and Gerstl, S.A.W., 1990 - Radiative transfer in three dimensional leaf canopies. Transport Theory and Statistical Physics, 19, 205-250.

Myneni R.B., Asrar G., 1994 - Atmospheric effects and spectral indices. Remote sensing of Environment, 47, 390-402.

Myneni R.B., Maggion S., Jaquinta J., Privette J.L., Gobron N., Pinty B., Kimes D.S., Verstraete M.M. and Williams D.L., 1995 - Optical Remote Sensing of vegetation: Modelling, Caveats and Algorithms. Remote Sensing of Environment, 5, pp 169-188

Myneni R.B., Williams D.L., 1994 - On the relationship between FAPAR and NDVI. Remote Sens. Environ 49 :200-211 (1994)

Nageleisen L. M. 1993 - Les dépérissements d'essences feuillues en France. RFF, XLV, 605-620.

Nemani R.R., Running S.W., 1989 - Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-infrared AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, 28(4), 276-284.

Neumann H.H., Den Hartog G., Shaw R.H., 1989 - Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in deciduous forest during Autumn leaf fall. *Agricultural and Forest Meteorology*, 45, 325-345.

Nichiporovich A. A., 1961 - On properties of plants as an optical system.

Sov. Plant Physiol., 8, 5, 536-546.

Niinemets U., Kull K., 1994 - Leaf weight per area and leaf size of 85 Estonian woody species in relation to shade tolerance and light availability.

Forest Ecology and Management, 70, 1-10.

Nilson T., 1971 - A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands, *Agric. Meteorol.*, 8, 25-38.

Nizinski J.J., Saugier B., 1988 - A model of leaf budding and development for a mature *Quercus* forest. *Journal Applied Ecology*, 25, 643-655.

Norman J.M., Jarvis P.G., 1974 - Photosynthesis in Sitka Spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). III. Measurements of canopy structure and interception of radiation. *J. Appl. Ecol.*, 11, 375-398.

Norman J.M., Campbell G.S., 1989 - Canopy structure, in: Pearcy R.W., Ehleringer J.R., Mooney H.A., Rundel P.W. (Eds.), *Plant Physiological Ecology : Field Methods and Instrumentation*, Chapman and Hall, London and New York, 1989, pp. 301-325.

Norman J.M., Welles J.M., 1983 - Radiative transfer in an array of canopies. *Agron. J.*, 75, 481-488.

Nosatovsky A. I., 1947 - On leaf position relative sun beams. *Trans. Krasnodar Inst. Food Industry*, 2, 35-44.

Norwine J., Gregor H., 1983 - Vegetation classification based on AVHRR satellite imagery. *Remote Sensing Environ.*, 13, 69-87.

Oker-Blom P & Smolander, 1988 - The ratio of shoot silhouette area to total needle area in scots pine. *Forest science*, 34 (4), 894-906.

Otto H.J., 1998 - Ecologie forestière. IDF editeur, 397 p.

Pearson R. L. and Miller L. D., 1972 - Remote mapping crop biomass for estimation of the productivity of the short grass prairie; Pawnee National grasslands, Colorado in Proceedings of the 8 th International Symposium on Remote sensing of Environment, ERIM, Ann Arbor, MI, pp 1357-1381.

Pearson J. A., Fahey T.J., Knight D.H., 1984 - Biomass and leaf area in contrasting lodgepole pine forests. Can. J. For. Res., 14, 259-265.

Peterson D.L., Spanner M.A., Running S.W. and Teuber K.B., 1987 - Relationship of Thematic Mapper Simulator data to leaf area index of temperate coniferous forest. Remote Sensing Environ., 22, pp 323-341

Pierce L.L., Running S.W., 1988 - Rapid estimation of coniferous forest leaf area using a portable integrating radiometer. Ecology, 67, 1762-1767.

Pinty B. and Verstraete M-M., 1992 - GEMI : A non-linear index to monitor global vegetatio for satelittes. Vegetatio, 101, 15-20.

Pinty B., Leprieur C., Verstraete M-M, 1993 - Towards a quantitative interpretation of vegetation indices. Part 1: Biophysical Canopy Properties and Classical Indices. Remote Sensing Reviews, 7, 127-150.

Planchais I., Pontailier J.Y., 1999 - Validity of leaf areas and angles estimated in a beech forest from analysis of gap frequencies, using hemispherical photographs and plant canopy analyser. Ann. For. Sci., 56, 1-10.

Prévot L., Doussan C., Clastre, P., 1996 - Les mesures de télédétection dans le domaine des micro-ondes actives. Actes de l'Ecole Chercheurs INRA en Bioclimatologie. Le Croisic, 25-29 Mars, 1996. Tome 2 : Du couvert végétal à la région, pp. 131-144. INRA- Service des Editions Route de Saint-Cyr F78026 versailles Cedex.

Qi J., Chehbouni A., Huete A. R., Kerr Y.H., Sorroshian S., 1994 - A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing Environ., 48, 119-126.

Richardson A. J., Wiegand C. L., 1977 - Distinguishing vegetation from soil background information. Photogramm. Eng. Remote sens., 43, 1541-1552.

Riou C., Valancogne C., Piéri P., 1989 - Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne. Vérification expérimentale. *Agronomie*, 9, 441-450.

Roberts J., Pymar C.F., Wallace J.S., Pitman R.M., 1980 - Seasonal changes in leaf area, stomatal and canopy conductances and transpiration from bracken below a forest canopy. *Journal of Applied Ecology*, 17, 409-422.

Rosema A., Verhoef W., Noorbergen H., Borgenius J.J., 1992 - A new forest light interaction model in support of forest monitoring. *Remote Sensing of Env.*, 42, 23-41

Ross J., 1981 - The radiation regime and architecture of plant stands. Dr Junk W, The Hague, The Netherlands (1981).

Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. and Harlan J. C., 1974 - Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS-1. *Third Earth Resources Technology Satellite Symposium 1*: pp. 309-317.

Running S.W., 1984 - Microclimate control of forest productivity : analysis by computer simulation of annual photosynthesis/transpiration balance in different environments. *Agric. For. Meteorol.*, 32, 267-288.

Running S.W., 1988 - Computer simulation of regional evapotranspiration by integrating landscape biophysical attributes with satellite data. Land surface evaporation, Measurement and parametrization. Edité par Schmugge T.J. and André J.C., pp. 359-369.

Running S.W., Coughan J.C., 1988 - A general model of forest ecosystem processes for regional applications : I- Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecol. Modelling*, 42, 125-154.

Running S.W., Nemani R.R., Peterson D.L., Band L.E., Potts D.F., Pierce L.L. and Spanner M.A., 1989 - Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis by coupling satellite data with ecosystem simulation. *Ecology*, 70, 1090-1101.

Running S. W., Gower S. T., 1991 - FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications : II Dynamic

carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology*, 9, 147-160.

Sabatier C., 1989 - Production du taillis châtaignier (*Castanea sativa*) en relation avec les caractéristiques stationnelles. Thèse de doctorat, Université de Paris Sud, France, 231 p.

Seguin B., Fisher A., Kerdiles H., Louhala S., Podaire A., 1992 - Suivi agroclimatique des cultures en France à partir des données NOAA, Météosat et SPOT. Proceedings of the conference on the application of Remote Sensing to Agricultural Statistics. Editors : Toselli F., Meyer-Roux J., Commission of the European communities, pp. 339-342.

Sellin A., 2000 - Estimating the needle area from geometric measurements: application of different calculation methods to Norway spruce. *Trees* (2000), 14, 215-222

Shelbrune V.B., Hedden R.L., Allen R.M., 1993 - The effects of site, density and sapwood permeability on the relationship between leaf area and sapwood area in loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Forest Ecology and Management*, 58, 193-209.

Sinoquet H., Andrieu B., 1993 - The Geometrical structure of plant canopies: characterization and direct measurement methods. in: Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Sinoquet H.(Eds.), *Crop structure and light microclimate: characterization and applications*, Sciences Update, INRA Editions, Paris, 1993, pp.131-158.

Sinoquet H., Varlet-Grancher C. and Bonhomme R., 1993 - Modelling radiative transfer within homogeneous canopies: basic concepts. in: Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Sinoquet H.(Eds.), *Crop structure and light microclimate: characterization and applications*, Sciences Update, INRA Editions, Paris, 1993, pp. 207- 228.

Sinoquet H., 1993 - Modelling radiative transfer in heterogeneous canopies and intercropping systems. in: Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Sinoquet H.(Eds.), *Crop structure and light microclimate: characterization and applications*, Sciences Update, INRA Editions, Paris, 1993, pp. 229- 252.

Sinoquet H., Oliso A., Guyon D., Zurfluh O., 1995 - Modélisation des transferts radiatifs dans le domaine solaire : modèles « classiques ». Actes de l'Ecole Chercheurs INRA en Bioclimatologie. Le Croisic, 3-7 Avril, 1995. Tome 1 : De la plante au couvert végétal, pp. 333-350. Département de Bioclimatologie INRA F78850 Thiverval-Grignon.

Smith N.J., 1993 - Estimating plant area index and light extinction coefficients in stands of Douglas-fir (*Pseudotsuga Menziesii*). Can. J. For. Res., 23, 317-321.

Smith N.J., Chen J.M., Black T.A., 1993 - Effects of clumping on estimates of stand leaf area index using the LI-COR LAI-2000. Canadian Journal of Forest Research, 23, 1940-1943

Smith F.W., Sampson A. D., Long N. J., 1991 - Comparison of leaf area index estimates from tree allometrics and measured light interception. Forest Science, 37, 6, 1682-1688

Soudani K., 1994 - Apports respectifs des bandes radar C et X pour la reconnaissance et la cartographie de l'occupation du sol. Tentative d'application à la mesure de la teneur en eau du sol. Mémoire de DEA, Systèmes spatiaux et aménagements régionaux, Université Louis Pasteur de Strasbourg, Octobre 1994, 61 pp.

Soudani K., 1999 - Etude de la structure et de la dynamique spatiale et temporelle des canopées forestières : approche par méthodes optiques indirectes et par télédétection, Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1999, 227 pp.

Soudani K., Raffy M., Trautmann J., Walter J.M., 1998 - Programme National de Télédétection Spatiale 1998. Modèles nouveaux pour l'estimation du LAI forestier par télédétection sur unités hétérogènes. Développements théoriques et modèles associées, CNRS, Contrat N° 98RR1/0169.

Soudani K., Trautmann J., Walter J-M., 2001 - Comparaison de méthodes optiques pour estimer l'ouverture de la canopée et l'indice foliaire en forêt feuillue. Comptes rendus de l'Académie des sciences C.R.Acad.Sci, Life Science 324 (2001) 381-392.

Soudani K., Trautmann J., Walter J-M., 2001, 2001 - Leaf area index and canopy stratification in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. Sous presse à International Journal of Remote Sensing.

Sprugel D.G., 1983 - Correcting for bias in log-transformed allometric equations. Ecology, 64, 209-210.

Spanner M., Pierce L.L., Peterson D.L. and Running S.W., 1990 - Remote Sensing of temperate coniferous forest leaf area index : the influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance. International Journal of Remote Sensing, 11, 95-111.

Stenberg P., Linder S., Smolander H., Flower-Ellis J., 1994 - Performances of the LAI-2000 plant canopy analyser in estimating leaf area index of some scots pine stands. *Tree Physiology*, 14, 981-995.

Tan C.S., Black T.A., 1976 - Factors affecting the canopy resistance of a Douglas Fir Forest. *Boundary Layer Meteorology*, 1976, 10, 475-488

Ter Steege H., 1997 - WINPHOT 5.0 - A programme to analyse vegetation indices, light quality from hemispherical photographs. Manual, Tropenbos-Guyana Reports 97-3, 52 pp.

Tucker C.J., Townsend J.R.G. and Goff T.E., 1985 - African land cover classification using satellite data. *Science*, 227, 369-374.

Turner D. P., Acker S. A., Means J. E., Garman S.L., 2000 - Assessing alternative allometric algorithms for estimating leaf area of Douglas-fir trees and stands. *Forest Ecology and Management*, 126, 61-76

Ulaby F.T., Moore R. K., Fung A.K., 1982 - *Microwave Remote Sensing : active and passive*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1064 pp.

Vanseveren, J.P.; Herbauts, J., 1977 - Index foliaire, paramètres foliaires et caractéristiques édaphiques. stationnelles dans quelques peuplements forestiers de Lorraine belge. *Ann. Sci. Forest.* 34, 215-229

Varlet-Grancher C., Chartier M., Gosse G., Bonhomme R., 1981 - Rayonnement utile pour la photosynthèse pour les végétaux en conditions naturelles : caractérisation et variations. *Oecol. Plant.*, 2, 189-202.

Varlet-Grancher C., Gosse G., Chartier M., Sinoquet H., Bonhomme R., Allirand j.M., 1989 - Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 9, 419-439.

Varlet-Grancher C., Julier B., Moulia B., Ripoche D., 1995 - Facteurs climatiques et mise en place des structures. Actes de l'Ecole Chercheurs INRA en Bioclimatologie. Le Croisic, 3-7 Avril, 1995. Tome 1 : De la plante au couvert végétal, pp. 41-60. Département de Bioclimatologie INRA F78850 Thiverval-Grignon.

Verstraete M., Pinty B. and Dickinson R., 1990 - A physical model of the bidirectional reflectance of vegetation canopies. 1 Theory. *Journal of Geophysical Research*, 95, pp 755-765, July 20, 1990.

Verhoef W., 1984 - Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sensing Environ.*, 16, 125-141

Vose J.M., Sullivan N.H., Clinton B.D. and Bolstad P.V., 1995 - Vertical leaf area distribution, light transmittance, and the application of the Beer-Lambert Law in four mature hardwood stands in the Southern Appalachians. *Canadian Journal of Forest Research*, 25, 1036-1043.

Vose J.M., W.T. Swank, 1995 - Assessing seasonal leaf area dynamics and vertical leaf distribution in eastern white pine (*Pinus strobus* L.) with a portable light meter. *Tree Physiology* 7, 125-134

Walsh J.W.T., 1961 - The science of daylight. Mac Donald, London, 285 pp.

Walter J.-M.N., Riéra B., Cournac L., Dubois M.-A., 2001 - Indice foliaire en forêt sur pente : l'Inselberg des Nouragues, Guyane Française. (communication personnelle)

Walter J.-M. N., 1994 - Méthodes d'étude de la végétation. Novembre 1994, Université Louis Pasteur de Strasbourg.

Walter J.-M. N., Grégoire-Himmler C., 1996 - Spatial heterogeneity of a Scots pine canopy : an assessment by hemispherical photographs. *Can. J. For. Res.*, 26, 1610-1619.

Walter J.-M. N., Torquebiau E.F., 1997 - The geometry of the canopy of a dipterocarp rain forest in Sumatra. *Agric. For. Meteorol.*, 85, 99-115.

Walter J.-M. N., 1999 - A package of Programs for the Assessment of Canopy Geometry and Transmission of Solar Radiation by Hemispherical Photographs. Part I : Canopy Geometry, Université Louis Pasteur Strasbourg I, Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques, Groupe de Recherches en Télédétection et Spatialisation.

Wang Y.P., Jarvis P.G., 1988 - Mean leaf angles for the ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*, 43, 319-321.

Waring R.H., 1983 - Estimating forest growth and efficiency in relation to canopy leaf area. *Adv. Ecol. Res.*, 13, 327-354.

Warren Wilson J., 1959 - Analysis of the spatial distribution of foliage by two-dimensional point quadrats. *New Phytologist*, 1959, 58, pp 92-101

Warren Wilson J., 1960 - Inclined point quadrats. *New Phytologist*, 1960, 59, pp 1-8

Warren Wilson J., 1963 - Estimation of feuillage densness and foliage angle by inclined point quadrats. *Aust. J. Bot.*, 11, 95-105

Weinstein D. A., Beloin R. M., Yanai R. D., 1991 - Modelling changes in red spruce carbon balance and allocation in response to interacting ozone and nutrient stresses. *Tree Physioly*, 9, 127-146.

Welles J.M., Norman J.M., 1991 - Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agron. J.*, 83, 818-825.

Welles J.M., 1990 - Some indirect methods of estimating canopy structure.

Remote Sens. Rev., 5, 31-43.

Wittaker R.H., 1967 - Gradient analysis of vegetation. *Bio. Rev.*, 1967, 42, 207-264

Wittwer S., 1983 - Land-related global habitability science issues. NASA Technical Memorandum 85841

De Witt C.T., 1965 - Photosynthesis of leaf canopies. *Agric. Res. Rept.* N° 663. Center for Agric. Publ. And Doc., Wagenungen, 57 p.

Woodman J.N., 1971 - Variation of net photosynthesis within the crown of a large forest-grown conifer. *Photosynthetica*, 1971, 5, 50-54

Zahner R., 1958 - Hardwood understory depletes soil water in pine stands.

Forest Science, 4, 178-184

**Diffusé par Ecofor
19, avenue du Maine
75 732 Paris Cedex 15**

**Couverture réalisée par Patricia Doucet (04 91 50 79 67)
Photos de couverture : photothèque du Ministère de l'Agriculture
et de la Pêche et Jean-Claude Borie**

Avril 2002